



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

**DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS
CONTINUOS Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS**

PROYECTO FIN DE CARRERA

**CARACTERIZACIÓN TERMO-MECÁNICA Y
ÓPTICA DE UNA FIBRA ÓPTICA DE NÚCLEO
POLIMÉRICO**

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL EN LA ESPECIALIDAD DE MECÁNICA

Autor: JOSÉ MARTINEZ GONZÁLEZ

Director del Proyecto: DR. JOSÉ LUIS PÉREZ CASTELLANOS

Leganés 2013



“Caracterización termo-mecánica y óptica de una fibra óptica de núcleo polimérico”

PROYECTO FIN DE CARRERA

“CARACTERIZACIÓN TERMO-MECÁNICA Y ÓPTICA DE UNA FIBRA ÓPTICA DE NÚCLEO POLIMÉRICO”

AUTOR: José Martínez González

DIRECTOR: José Luis Pérez Castellanos

TRIBUNAL CALIFICADOR:

Presidente:

Secretario:

Vocal:

El tribunal calificador anteriormente expuesto, califica con
la nota deel proyecto fin de
carrera aquí expuesto a fecha de hoy.....



AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fin de carrera es producto de una larga y satisfactoria carrera académica, que me ha servido para formarme tanto como persona como ingeniero. De este modo, los agradecimientos referidos a la parte de conocimientos y recursos técnicos debo asignárselos al personal docente de la Universidad Carlos III, sus profesores, en especial los que me han impartido clase y me han enseñado y formado para ser la persona que soy actualmente, y, evidentemente, a las personas que directamente me han ayudado y facilitado de manera directa hasta el día de hoy para poder realizar este proyecto. Mi mención especial por la colaboración y dedicación sobre éste queda referida al tutor de este proyecto, el Dr. José Luis Pérez Castellanos, profesor titular del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Agradecer, por supuesto, al personal técnico de este departamento por la realización de los ensayos en el Laboratorio, así como al Departamento de Electrónica, por la aportación de información y material que ha correspondido.

En la parte personal, este proyecto no lo habría podido realizar sin el apoyo de mis compañeros de carrera, con los cuales he podido entablar una gran amistad con muchos de ellos, fraguada por el trabajo del día a día que supone el realizar una carrera de estas dimensiones. Mención especial en la parte personal a mi familia y amigos: mi madre y mi padre, los cuales me han sabido educar, enseñándome los valores importantes de la vida y dándome todo el cariño y apoyo a lo largo de mi crecimiento; mi hermana Cristina, ingeniera en la especialidad de mecánica como seré yo tras la presentación de este proyecto, la cual me ha ayudado a comprender muchas cosas en mis duros



inicios de la carrera y que me ha ayudado en la vida en muchos sentidos, enseñándome los valores de la misma y como valerse por uno mismo; y mis amigos, importantes en su acompañamiento en momentos de ocio y en los malos momentos que han podido surgir durante este tiempo.

Finalmente, y para finalizar esta serie de agradecimientos, destacar el gran apoyo de Noelia Jiménez, que ha resultado ser pieza esencial en la realización de este proyecto.

Dedicado a la memoria de mi padre, agradeciéndole por todo lo que me ha enseñado y dado en la vida. Va por ti.

“Lo poco que sé se lo debo a mi ignorancia”, Platón



RESUMEN

La fibra óptica es uno de los conductores de información y datos más importante y eficaz de este siglo XX y XXI. Con este proyecto se quiere conocer el comportamiento mecánico y térmico de una fibra óptica de núcleo polimérico (POF) y la influencia de éstos sobre su capacidad de transmisión óptica.

La metodología de estudio en la que se pretende basar este proyecto tiene un fundamento teórico, en una primera instancia, y gran parte práctico, para constatar la veracidad de esta teoría mediante procesos experimentales y, si cabe, plantear nuevas incógnitas y comportamientos añadidos a la misma. Los datos obtenidos de variación de temperatura, mediante la utilización de la tecnología infrarroja (cámara infrarroja junto con el concepto de cuerpo negro, en un ensayo de deformación, mediante la utilización de una máquina universal de ensayo, van a permitir obtener las condiciones termo-mecánicas de una POF y su influencia en la transmisión óptica de la misma.



ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	5
RESUMEN	7
ÍNDICE.....	8
GLOSARIO DE FIGURAS Y TABLAS.....	11
1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. MOTIVACIÓN.....	14
1.2. OBJETIVOS.....	15
1.3. RAZONAMIENTO DE ESTUDIO	16
2. BASE TEÓRICA	18
2.1. Introducción a la Fibra Óptica.	18
2.1.1. Clasificación de Fibra Óptica.	19
2.1.2. Materiales constituyentes POF.	20
2.1.3. Comparación, ventajas e inconvenientes de las propiedades de transmisión de POF ante otros medios de transmisión.	22
2.2. Comportamiento termo-mecánico.	23
2.2.1. Comportamiento Mecánico de la POF.	24
2.2.2. Incremento térmico producido por la deformación.	25
2.2.3. Influencia de la temperatura y la velocidad: Comportamiento Viscoelástico.	27
2.3. Termografía Infrarroja (TIR).	29
2.3.1. Terminología TIR.....	29



2.3.2. Teoría de las Leyes de la Radiación.	30
3. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS.....	34
3.1. Esquema del Ensayo.....	34
3.2. Ensayo de tracción.....	35
3.2.1. Procedimiento del ensayo de tracción.....	36
3.2.2. Probetas de Ensayo.....	37
3.2.3. Máquina de Ensayo	42
3.2.4. Obtención y tratamiento de datos.	45
3.2.5. Caracterización mecánica de ensayos de tracción.	46
3.3. Medición experimental del ΔT por técnicas de termografía infrarroja.	51
3.3.1. Dispositivos y materiales de Laboratorio.	52
3.3.2. Procedimiento por etapas en el laboratorio	59
3.4. Medición de la Potencia Óptica.	62
4. RESULTADOS	63
4.1. Comportamiento a tracción de la fibra sin cubierta	64
4.2. Comportamiento a tracción de la fibra con cubierta.	74
4.3. Influencia de la velocidad de deformación en el comportamiento a tracción del núcleo de la fibra.	75
4.5. Comportamiento termo-mecánico de la fibra	80
4.5. Comportamiento víscido de la fibra.	77
4.6. Comportamiento fotoelástico de la fibra.....	83
4.6.1. Medición de la tensión óptica durante el proceso de deformación	83



4.6.2. Medición de la Potencia Óptica con la Velocidad de Deformación.....	89
5. CONCLUSIONES.....	90
6. TRABAJOS FUTUROS.....	94
7. BIBLIOGRAFÍA	95
ANEXO 1	
Calibración de la Cámara Infrarroja	102

GLOSARIO DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURAS.

Figura 1: Constitución de la fibra óptica (POF)	20
Figura 2: Composición química de PMMA, PS y PC.	21
Figura 3: Cadenas moleculares de un polímero en reposo, a) y sometido a tensión, b).....	24
Figura 4: Gráfica tensión-deformación típica de POFs (Jiang 2002).....	25
Figura 5: Gráfica fuerza-alargamiento obtenida en ensayos de tracción a diferentes temperaturas de probetas de SI-POF con recubrimiento de PE (Ziemann, 2008).	27
Figura 6: Gráficas tensión-deformación obtenida en ensayos de tracción a diferentes velocidades de deformación de probetas de POFs. (Kiesel et al., 2007)	28
Figura 7: Espectro de emisión para diferentes temperaturas	32
Figura 8: Gráfica transmisión óptica-alargamiento obtenida en ensayos de tracción a diferentes temperaturas de probetas de SI-POF con recubrimiento de PE	33
Figura 9: Esquema gráfico del ensayo	34
Figura 10: Ensayo de Tracción.....	35
Figura 11: Materiales de composición de la POF.....	37
Figura 12: Atenuación vs longitud de onda Fibra óptica HFBR-RUS500	38
Figura 13: Fibra óptica HFBR-RUS500	38
Figura 14: Tipos de sujeción fibra-chapa considerados	40
Figura 15: Tipo de Probeta.....	41
Figura 16: Máquina Universal de Ensayos INSTRON. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras	43
Figura 17: Mordazas de Máquina Universal de Ensayo del Laboratorio de la Universidad Carlos III de Madrid	44
Figura 18: Caracterización de Curva Tensión vs Deformación	48
Figura 19: Módulo de Young, E (MPa).....	49
Figura 20: Representación de parámetros principales en la curva mecánica característica.....	50
Figura 21: Cámara infrarroja FLIR SC600.....	51
Figura 22: Panorámica completa de Laboratorio de medición de ΔT por técnicas Infrarrojas Cámara de ensayos.	53
Figura 23: Cámara de ensayos	54



Figura 24: Interior Cámara de ensayos	54
Figura 25: Hornillo Eléctrico convencional	55
Figura 26: Acoplamiento de resistencia eléctrica en Cámara de ensayos.....	55
Figura 27: Controlador de temperatura.	56
Figura 28: Termo par en interior Cámara de ensayos conectado a dispositivo digital de medición.	57
Figura 29: Cámara Oscura del laboratorio	58
Figura 30: PC con software de visualización de datos	59
Figura 31: Montaje Placa calorífica en Caja Oscura	60
Figura 32: Pruebas con Cámara Oscura-Caja Oscura	61
Figura 33: Gráfica $\sigma-\epsilon$	64
Figura 34: Gráfica $\epsilon-t$	65
Figura 35: Determinación del Módulo de Young	67
Figura 36: Gráfica $\sigma-\epsilon$ obtenida en un ensayo con procesos de carga-descarga de probetas tipo P2	68
Figura 37: Pendientes de las descargas con la deformación	69
Figura 38: Evolución del módulo de Young con la deformación.....	70
Figura 39: Determinación gráfica del límite de elasticidad (rama Elastoplástica).....	71
Figura 40: Gráficas ϵ^e-t	72
Figura 41: Gráficas ϵ^p-t	72
Figura 42: Tramo de la gráfica $\sigma-\epsilon$ previa a la rotura.	74
Figura 43: Gráficas $\sigma-\epsilon$ y $\epsilon-t$ obtenidas en ensayos de probetas en los que se alcanzaron diferentes velocidades de deformación: 0,0005s ⁻¹ a), 0,0021s ⁻¹ b).....	76
Figura 44: Gráfica $\epsilon-t$ impuesta en un ensayo de relajación.....	78
Figura 45: Gráfica $\sigma-t$ obtenida en un ensayo de relajación	79
Figura 46: Gráfica Tensión Verdadera vs Deformación Verdadera a $\epsilon = 0,0004 s^{-1}$	80
Figura 47: Gráfica Comportamiento Elástico Temperatura vs Deformación Verdadera a $\epsilon = 0,0004 s^{-1}$	81
Figura 48: Gráfica Tensión Verdadera vs Deformación Verdadera a $\epsilon = 0,0025 s^{-1}$	81
Figura 49: Gráfica Comportamiento Plástico Temperatura vs Deformación Verdadera a $\epsilon = 0,0025 s^{-1}$	82
Figura 50: Gráfica Tensión óptica recibida vs tiempo en simultaneidad con ensayo de tracción.....	84
Figura 51: Gráfica Tensión Verdadera vs Deformación Verdadera en simultaneidad con mediciones de atenuación óptica	84
Figura 52: Gráfica Deformación Verdadera vs Tiempo en simultaneidad con mediciones de atenuación óptica.....	84
Figura 53: Gráfica Tensión óptica recibida vs tiempo en simultaneidad con ensayo de tracción (2).....	85



Figura 54: Gráfica Tensión Verdadera vs Deformación Verdadera en simultaneidad con mediciones de atenuación óptica (2).....	85
Figura 55: Gráfica Deformación Verdadera vs Tiempo en simultaneidad con mediciones de atenuación óptica (2).....	86
Figura 56: Zoom y promediado de los datos representados en Figura 53.	87
Figura 57: Intensidad óptica recibida en % respecto del valor en reposo.....	87
Figura 58: Evolución de la Intensidad Óptica con la deformación.	88
Figura 59: Evolución del Promedio de Potencia óptica relativa con la Deformación y con la Velocidad de deformación.	89
Figura 60: SC600 – “Set up” Cámara IR. Configuración de conexión.	103
Figura 61: SC600 – Módulo de caracterización de parámetros iniciales de imagen.....	104
Figura 62: SC600 – Presets (Preset 0 – Ti=2ms).....	104
Figura 63: SC600 – Window Size (320 x 256).....	105
Figura 64: SC600 – Frame Rate (f=400Hz).....	105
Figura 65: RDac Properties – Acquisition Options	106
Figura 66: ROI’S de Medida.....	107
Figura 67: ROI’S de Medida.....	107
Figura 68: RDac Archivo generado enlace RCal (cal_0.1-0.2ms_25-125C.inc)	108
Figura 69: Prueba A.....	110
Figura 70: Prueba A; ROI’S de medida.	110
Figura 71: Prueba A; Tabla de datos diferentes ROI’S.....	111
Figura 72: Prueba B.....	113
Figura 73: Prueba B. Emisvidades constantes. ROI’S puntuales.....	114

TABLAS

Tabla 1: Propiedades de materiales de núcleo de fibra óptica plástica.....	21
Tabla 2: Comparación de las propiedades de fibra plástica, de vidrio y conductores de cobre	22
Tabla 3: Datos característicos HFBR-RUS500.....	37
Tabla 4: Tabla de Dimensiones y Características Fibra en ensayo.....	39
Tabla 5: Tensión y Deformación: Valores Ingenieriles a Valores Verdaderos	47
Tabla 6: Valores Ingenieriles y Verdaderos V_{cte}	47
Tabla 7: Características técnicas de la Cámara IR FLIR SC600.....	52
Tabla 8: Parámetros mecánicos y velocidad de deformación	76
Tabla 9: Valores de temperatura ROI’S Prueba A.....	112
Tabla 10: Valores de temperatura ROI’S Prueba B	114



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La fibra óptica tiene un papel importante en los sistemas de transmisión de energía al tratarse de su medio conductor. A día de hoy, en su aplicación, instalación y mantenimiento, resulta de vital importancia proteger lo máximo posible su integridad. No siempre es posible, ya que la fibra se ve expuesta a las condiciones de estado de los lugares donde está instalada: estructuras civiles (puentes, edificios, etc), estructuras aeronáuticas (alas, bastidores, motores de avión, etc), automoción ó industria ferroviaria, entre otras muchas. En definitiva, es por este hecho que resulta importante conocer sus propiedades y características termo-mecánicas y la influencia de éstas sobre la capacidad óptica de la fibra.

1.2. Objetivos.

El presente proyecto se ha desarrollado en el Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Escuela Politécnica de la Universidad Carlos III de Madrid, con el pertinente uso de sus instalaciones y equipos. También ha resultado importante la estrecha colaboración existente con el Departamento de Electrónica, mediante la cesión de información y material.

Los objetivos principales de este proyecto son:

- A. Caracterización mecánica de la POF desarrollada en los siguientes puntos:
 - Realización de ensayos de tracción sobre fibra óptica plástica en diferentes condiciones ensayo.
 - Evaluación y análisis del comportamiento de la fibra óptica en cada una de las pruebas realizadas, según *Ley de Hooke*.
 - Resultado y análisis de valores de los principales parámetros mecánicos (Módulo de elasticidad, límite elástico, carga de rotura, etc.).
- B. Analizar la influencia de la velocidad de deformación en el rango cuasi-estático.
- C. Medición del incremento de temperatura de la POF en su proceso de deformación mediante la utilización de una cámara de infrarrojos (Cámara IR).

D. Influencia del comportamiento termo-mecánico en la transmisión óptica de la fibra.

1.3. Razonamiento de estudio.

La deformación mecánica de una fibra óptica plástica consiste en un alargamiento sobre su longitud inicial (deformación axial) y una disminución de su sección. En este estudio, centraremos el comportamiento de la fibra en el primero de los casos. Esto se va a correlacionar con la transmisión óptica de la fibra, ya que la deformación provocará una variación en el Índice de Refracción de una onda de luz propagada por la misma. Con esto, se pretenderá observar el efecto desfavorable que ejerce la variación de la longitud de la fibra sobre la potencia óptica transmitida tras esa variación del índice de refracción (Efecto Fotoelástico).

Todo ello representará un sistema sensado y monitorizado de la deformación de una POF.



“Caracterización termo-mecánica y óptica de una fibra óptica de núcleo polimérico”



CAPÍTULO 2

BASE TEÓRICA

2.1. Introducción a la Fibra Óptica.

En 1820, *Augustin-Jean Fresnel* ya conocía las ecuaciones por las que se rige la captura de la luz dentro de una placa de cristal lisa. Su ampliación a cables de vidrio fue llevada a cabo por los investigadores *D.Hondros* y *Peter Debye* en 1910. Poco antes, en 1840, el confinamiento de luz por refracción, el principio esencial de la fibra óptica, fue demostrado por los investigadores *Daniel Colladon* y *Jaques Babinet*. El primer uso importante de la fibra óptica, ya que todos sus usos iniciales fueron experimentales, fue en el endoscopio médico (patentado de endoscopio semiflexible, por la Universidad Michigan en 1956). Fue a partir de 1960, a raíz de la invención del láser (amplificador de luz por emisión estimulada de radiaciones), cuando las investigaciones se dirigieron hacia la realización de un sistema de transmisión por fibras ópticas para transmitir una gran cantidad de datos de información debida a la alta frecuencia del portador utilizado (10¹⁴Hz). A día de hoy, la fibra óptica representa uno de los medios de transmisión de datos e información más importantes del sector de las telecomunicaciones.

La fibra óptica queda definida como un hilo muy fino de material transparente, de vidrio o material plástico, por el que se envían pulsos de luz que representan los datos a transmitir. El haz de luz en cuestión queda completamente confinado y se propaga por el núcleo de la fibra con un ángulo de reflexión por encima del ángulo límite de reflexión total (*Ley de Snell*).

Actualmente las aplicaciones más importantes de la fibra óptica se centran en el sector de las telecomunicaciones por su alta capacidad y velocidad de transporte de energía e información (Internet, TV, Teléfono, comunicación de sistemas integrados, etc). En algunas de estas aplicaciones la fibra se integra en elementos estructurales de forma tal que es sometida a diferentes estados de tensión, deformación y temperatura.

2.1.1. Clasificación de Fibra Óptica.

El tipo de fibra óptica puede variar en dimensión y composición, dependiendo de su uso y condiciones de exposición.

Su principal clasificación viene determinada por su composición:

- POF ó Fibra óptica plástica, compuesto en su mayoría por materiales plásticos y polímeros.
- PCF-OF, fibra constituida internamente por cristales *photonic*.
- Glass OF ó Fibra de Vidrio.

2.1.2. Materiales constituyentes POF.

La POF es una fibra fabricada fundamentalmente de plástico, constituida por tres polímeros concéntricos. Interiormente por un conducto denominado Núcleo, por el cual discurre la onda de luz transmitida, y exteriormente, por dos conductos de mayor diámetro que el anterior y que le sirve de protección del primero, su Revestimiento y la cubierta protectora (Figura 1.).



Figura 1: Constitución de la fibra óptica (POF)

Por lo general, el núcleo de POF está compuesto por polimetacrilato (PMMA), exceptuando aplicaciones específicas que puedan requerir policarbonato (PC) ó poliestireno (PS). (Veáse Tabla 1. y Figura 2.).

Material	Indice de Refracción, n_1	Atenuación Óptica/Longitud de Onda	Temperatura de Transición Vítrea
PMMA	1,49	70-100 db/km / 570 nm 125-150 db/km / 650 nm	105 °C
PC	1,58	700 db/km / 580 nm 600 db/km / 765 nm	150 °C
PS	1,59	90 db/km / 580 nm 70 db/km / 670 nm	100 °C

Tabla 1: Propiedades de materiales de núcleo de fibra óptica plástica

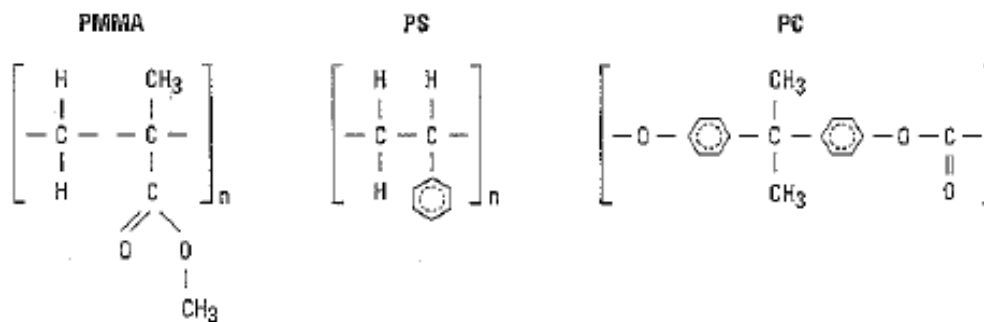


Figura 2: Composición química de PMMA, PS y PC.

El PS, según la tabla expuesta anteriormente, es muy frágil, lo que conlleva a su vez que tenga una atenuación óptica muy baja comparada con el PMMA y el PC. Debido a su alta resistencia a la temperatura, el PC es particularmente adecuado para aplicaciones donde existe una alta temperatura ambiente, como pueda ser la industria del automóvil o la aeronáutica, pero, por el contrario, tiene mayor resistencia a la flexibilidad que el PMMA, lo que resulta problemático en lo que se refiere a la influencia de la deformación. Por las ventajas que muestra el PMMA, le convierte en el material para fibra óptica plástica más comúnmente utilizado y, por tanto, la composición de fibra a estudio en el presente proyecto.

2.1.3. Comparación, ventajas e inconvenientes de las propiedades de transmisión de POF ante otros medios de transmisión.

En la Tabla 2., que se representa a continuación, se comparan las características y propiedades principales que definen y que diferencian la fibra óptica plástica de otros medios de transmisión como son la fibra de vidrio y el cobre.

Propiedades	POF	Fibra de Vidrio	Cobre
Compatibilidad Electromagnética	++	++	-
Aislamiento Eléctrico	++	++	-
Inmunidad a Interferencias	+	+	-
Riesgo en entornos peligrosos	++	++	-
Bajo peso	+	+	-
Flexibilidad	+	-	+
Radio de Curvatura Pequeño	+	-	+
Conexión	++	-	+
Ancho de Banda	+	++	+
Atenuación Óptica	-	+	
Coste Económico	++	-	+

++ muy bien; + bien; - mal

Tabla 2: Comparación de las propiedades de fibra plástica, de vidrio y conductores de cobre

La tecnología incipiente de la fibra óptica plástica y de la fibra de vidrio, aventajan de manera importante al cobre en su funcionalidad como medio de transmisión de datos y comunicación, ya que el ancho de banda y la atenuación óptica de éste último, quedan mermados en su comparación. En cambio, en un segundo grupo de propiedades, dirigidas al comportamiento mecánico y físico-

químico, quedan notoriamente igualadas las fuerzas en lo que se refiere, sobre todo, a la fibra plástica y al conductor de cobre. Este aspecto de valoración deja atrás en la clasificación, por tanto, a la fibra de vidrio, más frágil y vulnerable a componentes y cargas externas. Es el menor diámetro de uso de la POF uno de los principales elementos diferenciadores con los otros dos medios, ya que permite a la POF transportar una cantidad de luz mayor que los otros medios de transmisión, y por otra, realizar conexiones por tramos con mayor facilidad y con menor pérdida de transmisión, algo importante para largas distancias de transmisión. Esto otorga a la fibra POF una posición preferencial con respecto a los medios de transmisión por fibra de Vidrio y por conductor de cobre. A esta mejor compensación de las propiedades se le une su menor coste económico.

2.2. Comportamiento termo-mecánico.

La aplicación térmica y la velocidad de deformación sobre el material tienen diferentes consecuencias sobre su estado mecánico. Para su caracterización se requiere obtener sus relaciones tensión-deformación mediante ensayos en los que puedan ser deducidos y controlados los valores de los principales parámetros mecánicos del material.

Cuando un material se deforma plásticamente, se genera calor, por un incremento térmico en la superficie de la probeta deformada. Este incremento de temperatura puede cuantificarse mediante técnicas de termografía infrarroja, que más adelante se detallarán en los ensayos experimentales realizados.

2.2.1. Comportamiento Mecánico de la POF.

Al aplicar una carga de tracción a un polímero, las cadenas moleculares se separan progresivamente bajo la acción de la tensión. Para valores bajos de ésta, si se elimina la carga aplicada, las cadenas moleculares recuperan prácticamente su posición inicial debido a las fuerzas moleculares que las unen. En esta situación se dice que el material tiene un comportamiento elástico. Al incrementar el valor de la carga, las cadenas moleculares empiezan a desenredarse y estirarse alcanzando posiciones relativas estables y, en consecuencia, deformaciones permanentes (plásticas) en el polímero (Ver Figura 3.).

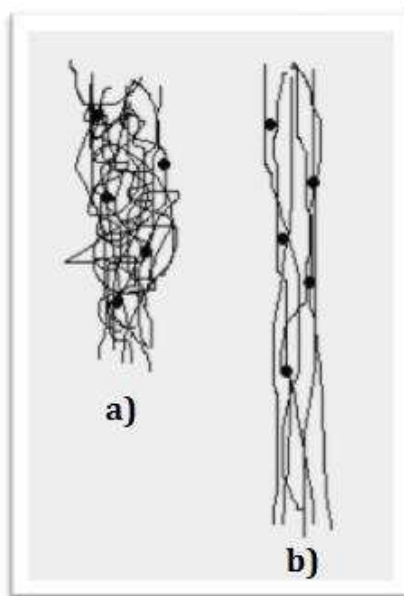


Figura 3: Cadenas moleculares de un polímero en reposo, a) y sometido a tensión, b)

En la gráfica tensión-deformación de un polímero, como el PMMA de la Figura 4., se distinguen tres zonas o regiones correspondientes con las situaciones de deformación progresiva de las cadenas moleculares. La primera, la región elástica, no es generalmente lineal como la que podría identificarse para un material metálico. Este motivo dificulta distinguir esta primera zona de la

segunda, la denominada región elastoplástica, ya que la estimación del valor de la tensión frontera o límite de elasticidad depende de la velocidad de aplicación de la carga. Para un cierto valor de la tensión aplicada las cadenas moleculares alcanzan su máxima elongabilidad produciéndose entonces un endurecimiento cada vez más acentuado del polímero (región de endurecimiento), ya en la tercera y última zona del proceso antes de la rotura del material.

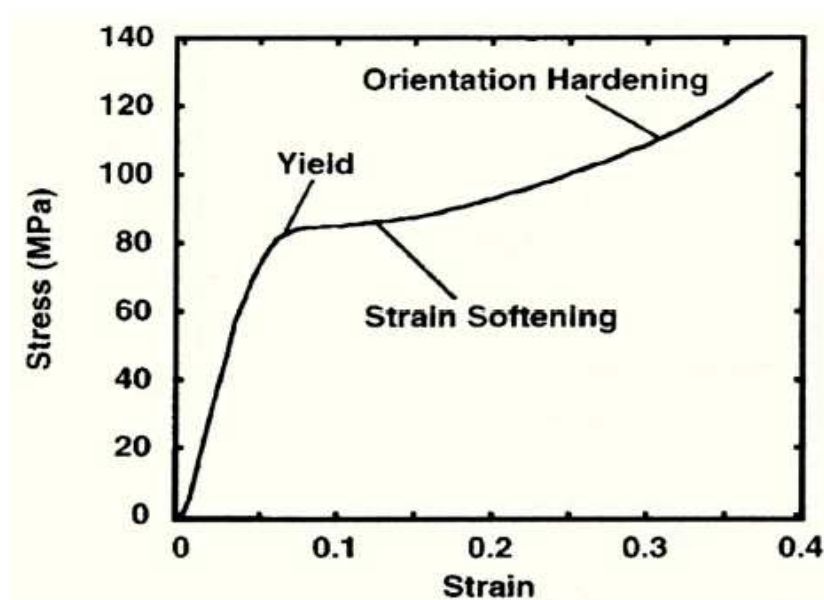


Figura 4: Gráfica tensión-deformación típica de POFs (Jiang 2002).

2.2.2. Incremento térmico producido por la deformación.

A la relación tensión-deformación hay que añadirle también la multitud de situaciones en las cuales aparece la temperatura. En la deformación de un material se producen variaciones de temperatura, lo que se denomina *Efecto Gough-Joule*. De manera inversa, una variación térmica también puede generar una deformación del material expuesto. En este estudio únicamente se va

considerar el primero de los casos, es decir, una deformación que como consecuencia provoca una variación de temperatura

La influencia de la deformación en la variación de la temperatura superficial de una POF queda determinada por la ecuación de balance de calor (9), demostrándose con ésta que parte de la energía generada en el proceso de deformación de un material se convierte en energía calorífica,

$$\dot{T} - k\Delta T = -\left(\frac{E\alpha}{1-2\nu}\right)\frac{T_o\Delta T_r(\varepsilon)}{\rho C_p} + \frac{\beta}{\rho C_p}\sigma:\dot{\varepsilon}^p \quad (1)$$

donde α es el coeficiente de dilatación térmica del material, ρ la densidad, ν el coeficiente de Poisson, E el Módulo de Young, C_p el calor específico y β el coeficiente de Quinney-Taylor.

Si el material es sometido a un ensayo de tracción, como es el caso estudiado, el término que representa el comportamiento elástico de la fibra (10) provocará un decremento de la temperatura superficial durante el proceso,

$$-\left(\frac{E\alpha}{1-2\nu}\right)\frac{T_o\Delta T_r(\varepsilon)}{\rho C_p} \quad (2)$$

mientras que la componente plástica, dará lugar a un incremento térmico, según el término (11),

$$\frac{\beta}{\rho C_p}\sigma:\dot{\varepsilon}^p \quad (3)$$

La variación de temperatura al aplicar a la probeta un ensayo de tracción podrá medirse mediante técnicas de termografía infrarroja, que se detallará más adelante.

2.2.3. Influencia de la temperatura y la velocidad: Comportamiento Viscoelástico.

Los polímeros muestran, en general, una gran dependencia de sus propiedades con la temperatura y la velocidad de deformación, lo que se denomina comportamiento Viscoelástico.

En la Figura 5. se muestra una gráfica Fuerza-Alargamiento (Ziemann, 2008), en ensayos de tracción a diferentes temperaturas de probetas de POF con recubrimiento de polietileno (PE).

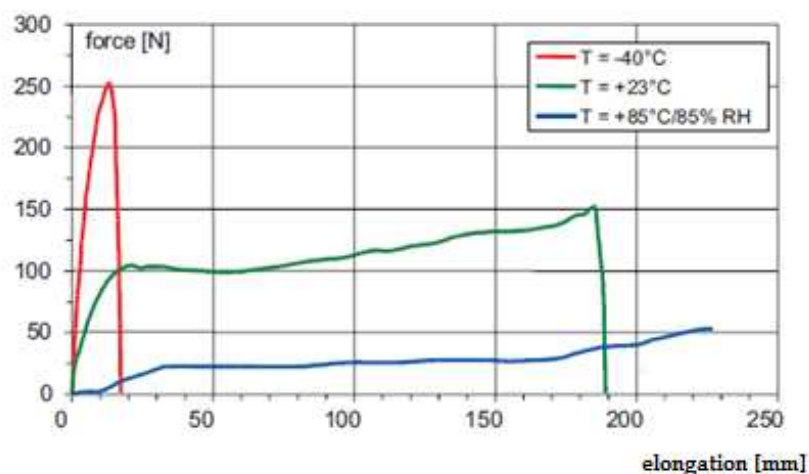


Figura 5: Gráfica fuerza-alargamiento obtenida en ensayos de tracción a diferentes temperaturas de probetas de SI-POF con recubrimiento de PE (Ziemann, 2008).

Se muestra la gran influencia de la temperatura en la relación tensión-deformación del material. Al aumentar la temperatura por encima de la temperatura de transición, se produce una fuerte caída de las propiedades mecánicas, ya que el material pierde su capacidad resistente y aumenta en un alto grado su elongabilidad. Por el contrario, por debajo de la temperatura de transición, el material aumenta su rigidez y su recorrido elástico, pero disminuye drásticamente su elongabilidad, produciéndose la rotura del material a muy bajas deformaciones.

En el comportamiento viscoelástico del polímero es tan importante las condiciones térmicas del proceso como la influencia cinética de la deformación de éste. En la Figura 6. (Kiesel *et al*, 2007) se representa una gráfica tensión-deformación obtenida en ensayos de tracción cuasi-estáticos a diferentes velocidades de deformación $\dot{\epsilon}$ de probetas de POFs.

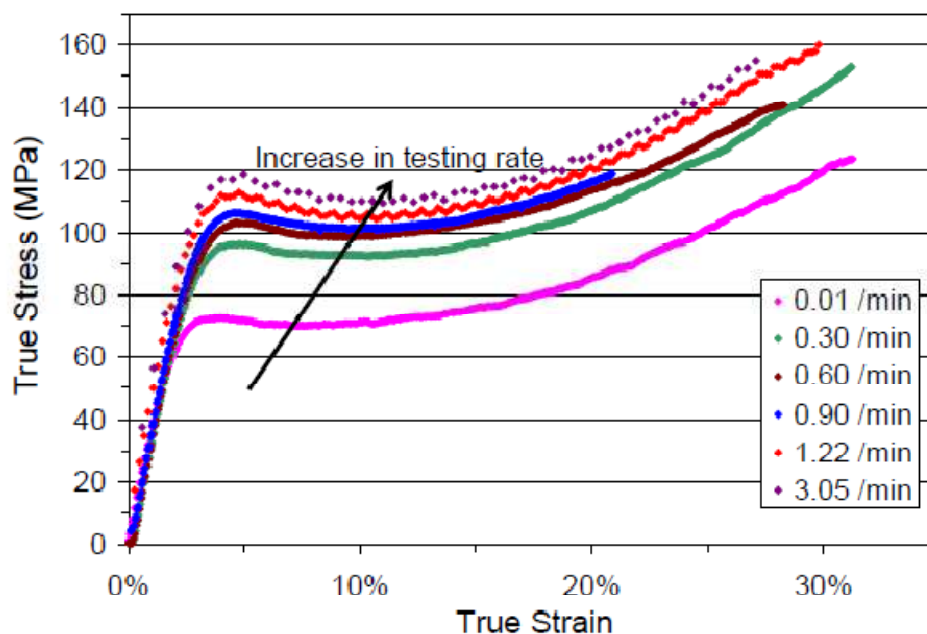


Figura 6: Gráficas tensión-deformación obtenida en ensayos de tracción a diferentes velocidades de deformación de probetas de POFs. (Kiesel *et al.*, 2007)

La velocidad de deformación ejerce una notable influencia sobre la curva tensión-deformación de un material polimérico. La figura anterior refleja que, efectivamente, el material muestra una mayor oposición o resistencia a la deformación con el aumento de la velocidad de ésta. Esta situación puede justificarse y relacionarse con la temperatura, y es que al no haberse producido un incremento térmico suficiente, el material tiende a potenciar su capacidad de resistencia y a disminuir su elongabilidad.

2.3. Termografía Infrarroja (TIR).

La Termografía Infrarroja (TIR) es la técnica de producir una imagen visible consecuencia de la luz infrarroja invisible (para el ojo humano) emitida por objetos de acuerdo a su condición térmica, (*Astarita, 2006*. Su origen se otorga *W. Herschel*)

Esta tecnología trata de ser un método de diagnóstico, evaluación y prueba, que además, genera imágenes infrarrojas de los objetos, denominados *termogramas*, o fotografías del "calor", en las cuales se puede medir su temperatura. Al estar basada en imágenes representa un sistema de medida bidimensional, pero que mediante el tratamiento de sus datos de manera apropiada, pueden ofrecer una información tridimensional.

2.3.1. Terminología TIR.

- **Campo radiativo.** es el campo electromagnético transportado por las ondas entre el emisor y el receptor. La energía asociada con la onda electromagnética se denomina energía radiante.

- **Emisividad**, las leyes de Planck, Stefan y Wien, nos permiten obtener como sería la radiación de un cuerpo a una temperatura dada si su eficiencia fuera del 100 %. En realidad este no suele ser el caso, sino que todos los cuerpos tienen una emisividad algo inferior a 1. En función de la emisividad, los cuerpos pueden dividirse en:
 - **Cuerpo negro o radiador perfecto**, el que emite radiación al máximo de sus posibilidades
 - **Cuerpo gris**, aquel en el que $0 < \epsilon < 1$.
 - **Reflector perfecto**, $\epsilon = 0$.
 - **Radiador selectivo**, $\epsilon_\lambda = f(\lambda)$, es decir la emisividad depende de la longitud de onda que se considere.

2.3.2. Teoría de las Leyes de la Radiación.

La ecuación que nos muestra la cantidad de energía emitida en un proceso de radiación viene formulada por la *Ley de Planck*.

Ley de Planck.

La excitancia espectral de un cuerpo negro que está a una temperatura absoluta T puede ser expresada según la siguiente función empírica:

$$M_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (4),$$

donde M_λ es la **emitancia espectral** medida en $\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}\mu^{-1} = \text{Wm}^{-2}\mu^{-1}$, representando la cantidad de energía emitida en la longitud de onda λ por cada metro cuadrado de superficie del objeto cada segundo; T es la temperatura en grados Kelvin; $c_1 = 3,74 \cdot 10^8 \text{Js}^{-1}\text{m}^{-1}\mu^{-4}$ y $c_2 = 1,44 \cdot 10^4 \mu\text{K}$ son constantes.

De esta ecuación, relativamente compleja, derivan dos sencillas ecuaciones que describen de forma más simple la relación de la temperatura con la radiación. En primer lugar la *ley de Stefan-Boltzman*, y posteriormente la que representa la *ley de Wien*.

Ley de Stefan-Boltzman.

La ecuación (5) que da significado a esta ley resulta,

$$M = \sigma T^4 \quad (5)$$

que es la integral de la ecuación de la ley de Planck y permite, por tanto, calcular el total de energía emitida por un cuerpo a la temperatura T sumando las emisiones para cada una de las longitudes de onda, siendo σ la constante de Stefan cuyo valor es $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} J/sm^2 K^{-4}$.

Ley de Wien.

En segundo lugar y aún más sencilla es la *Ley de Wien* (6),

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (6),$$

que nos permite calcular a que longitud de onda se produce el pico de máxima emisión de energía de un cuerpo a una temperatura T. Como puede observarse, a mayor temperatura menor longitud de onda (Figura 7.).

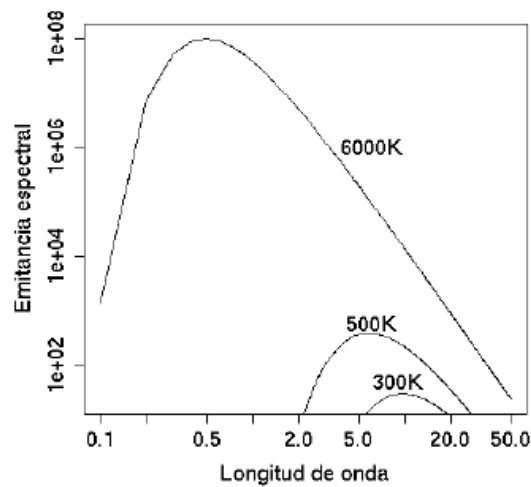


Figura 7: Espectro de emisión para diferentes temperaturas

2.4. Influencia de la deformación en la Potencia Óptica transmitida.

La deformación y los cambios de temperatura pueden hacer variar las propiedades ópticas del material de la fibra y, entre ellas, del Índice de Refracción. El efecto óptico de cargas longitudinales sobre la fibra ha sido bien documentado (Butter 1978, Haslach H.W. 1991, Van Steenkiste 1997). Según estos autores, el cambio en el Índice de Refracción efectivo, n_e , tiene dos componentes (7): una relacionada con el cambio en el diámetro del núcleo de la fibra y otra relacionada con la deformación longitudinal de ésta, *Efecto Fotoelástico* (Butter 1978),

$$\Delta n_e = \frac{dn_e}{da} \cdot \frac{da}{d\varepsilon} \cdot \varepsilon + \frac{dn_e}{d\varepsilon} \cdot \varepsilon \quad (7)$$

siendo a el radio del núcleo de la fibra y ε la deformación.

La influencia de la temperatura de trabajo y de la velocidad de aplicación de la carga en la transmisión óptica de la fibra está directamente relacionada con la influencia de estos parámetros en el comportamiento mecánico de la fibra.

En la Figura 8. se muestra, como ejemplo, una gráfica transmisión óptica-desplazamiento en ensayos de tracción a diferentes temperaturas de probetas de POFs con recubrimiento de polietileno (Ziemann, 2008).

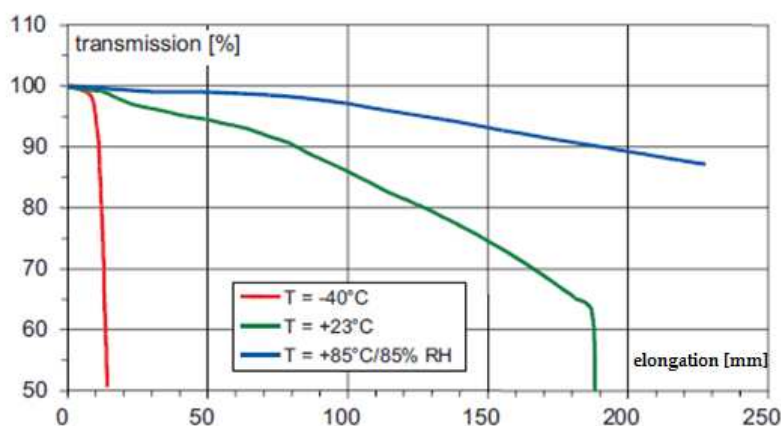


Figura 8: Gráfica transmisión óptica-alargamiento obtenida en ensayos de tracción a diferentes temperaturas de probetas de SI-POF con recubrimiento de PE

Se pone en evidencia la gran influencia de la temperatura del ensayo en la transmisión óptica. La relación potencia transmitida-deformación decae con la temperatura del ensayo, como de alguna manera podría intuirse. Para temperaturas por debajo de la temperatura de transición dúctil-frágil del polímero, la proporción de potencia transmitida puede reducirse a valores muy pequeños aun cuando el material haya sufrido pequeñas deformaciones.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

3.1 Esquema del Ensayo.

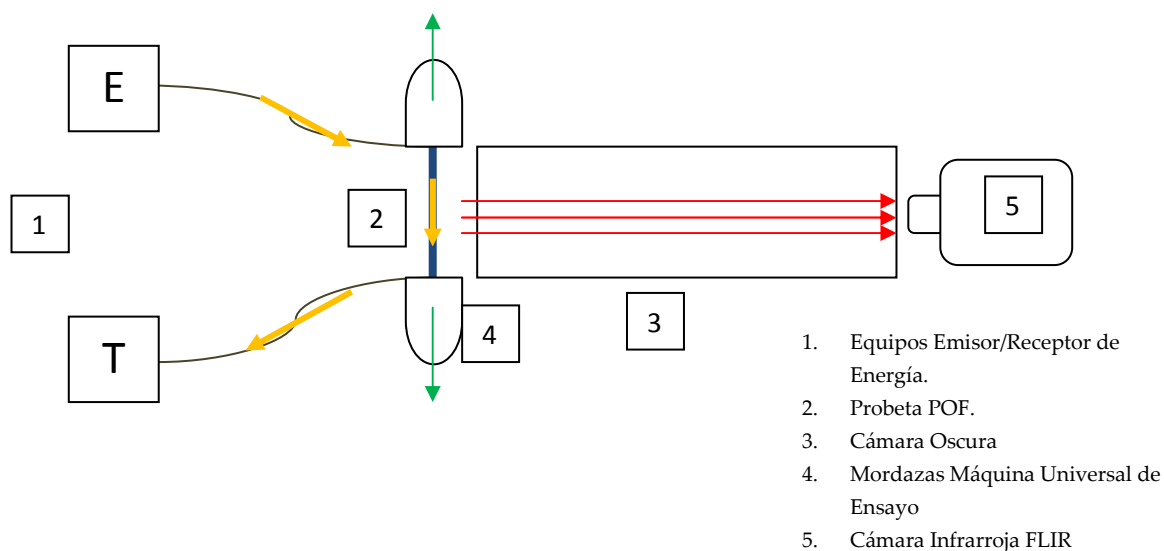


Figura 9: Esquema gráfico del ensayo

En la Figura 9 se observa como el ensayo que fundamenta este proyecto está definido por varias mediciones que se realizan de manera simultánea:

1. Medición de los parámetros de caracterización mecánica mediante Ensayo de tracción.
2. Medición del Incremento Térmico por la deformación de 1.
3. Medición de la variación de la atenuación óptica por la deformación de 1 y el incremento térmico de 2.

3.2 Ensayo de tracción.

Este ensayo permite obtener información sobre la capacidad de un material para soportar la acción de cargas estáticas o de cargas variables hasta cierta magnitud.

El ensayo se realiza alargando una probeta de geometría normalizada, con una longitud inicial l_0 , que previamente queda amarrada entre las mordazas de la máquina de ensayo (véase Figura 10.). Una de las mordazas de la máquina esta unida al cabezal móvil y se desplaza respecto a la otra con velocidad uniforme durante la realización del ensayo. Las máquinas de ensayo disponen de sistemas de medida, células de carga y extensómetros, que permiten registrar la fuerza aplicada y la deformación producida mientras las mordazas se están separando.

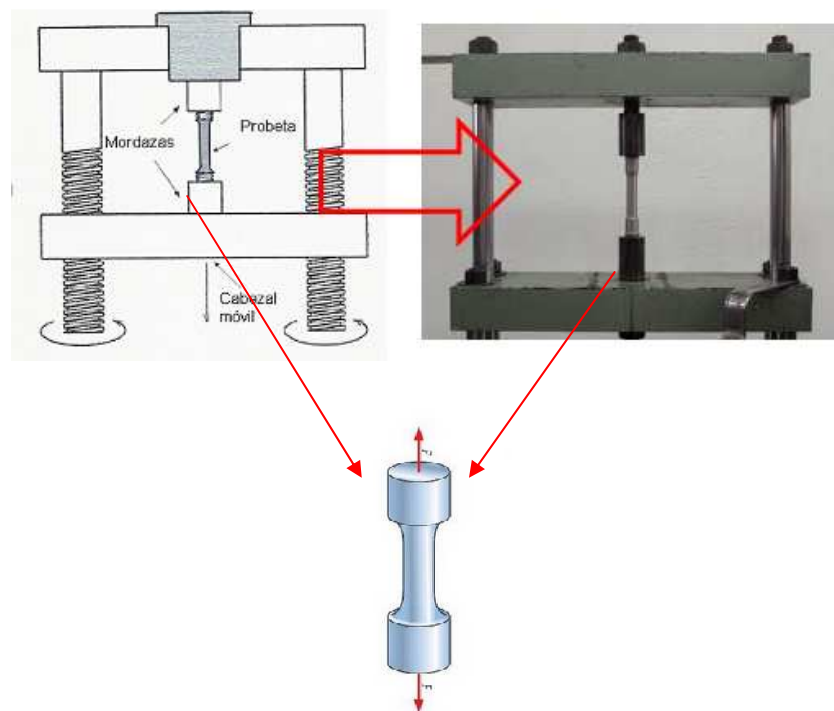


Figura 10: Ensayo de Tracción.

3.2.1. Procedimiento del ensayo de tracción.

Para la anotación de mediciones de alargamiento, lo primero es marcar el tramo de calibración. A continuación, se realizan los reglajes correspondientes sobre la máquina, para ya dar comienzo al ensayo.

1. Se coloca la probeta en los dispositivos de sujeción (mordazas), y se ha de comprobar su correcta sujeción y posicionamiento.
2. Se fija una velocidad de ensayo. Ésta no debe ser muy elevada para no influir en la medición primordial del ensayo.
3. Después de que la probeta ha fallado, se retira ésta de la máquina de ensayo y se toman las mediciones de los valores de alargamiento. Los extremos rotos de la probeta se juntan y se mide la distancia entre los puntos de referencia.
4. **La curva tensión-deformación ingenieril** resultante del ensayo se construye representando la tensión ingenieril, que es la razón de la fuerza aplicada a la sección recta inicial de la probeta, frente al alargamiento, que se define como la extensión porcentual referida a la longitud inicial, $\frac{(L-L_0)}{L_0} \times 100\%$.
5. La determinación del comportamiento real de un material nos la muestra la curva de los valores de Tensión y Deformación Verdaderas.

3.2.2. Probetas del Ensayo.

Materiales de POF.

La POF utilizada ha estado formado por un Núcleo, de PMMA, un Revestimiento, de Polímero Fluorado, y una Cubierta Protectora, también de material plástico (Véase Figura 11.).

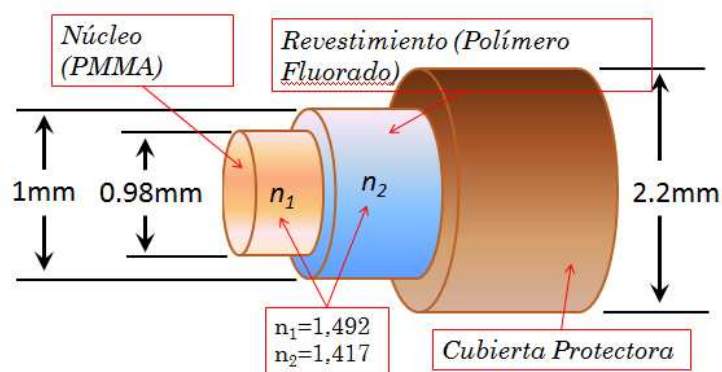


Figura 11: Materiales de composición de la POF

El modelo de POF utilizada ha sido una fibra estándar de salto de índice de 1000 μm , la **HFBR-RUS500 de Agilent** (Tabla 3.)

MODELO	HFBR-RUS500
$\varnothing(\text{mm})$	1
ATENUACIÓN TÍPICA (dB)	0,22-0,19

Tabla 3: Datos característicos HFBR-RUS500

Esta fibra tiene una atenuación típica de 0,22 dB/ms con respecto a su longitud de onda λ (Véase Figura 12.).

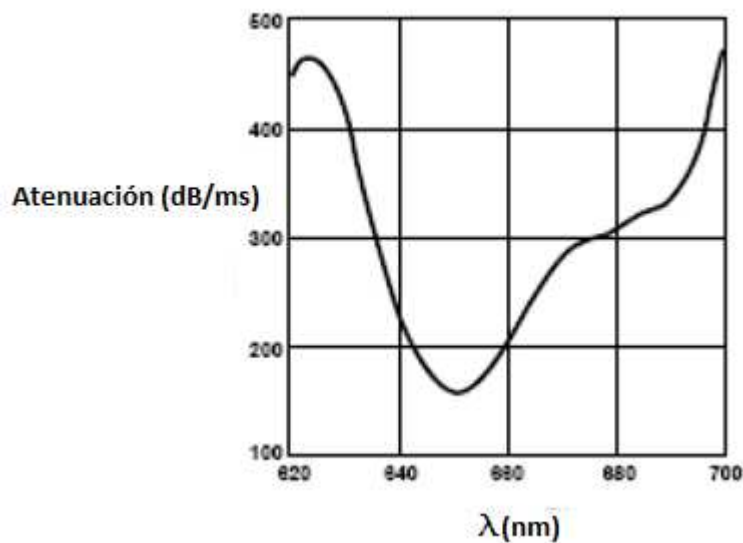


Figura 12: Atenuación vs longitud de onda Fibra óptica HFBR-RUS500

Además, se trata de una serie de cable monomodo de índice escalonado, protegido por una cubierta de polietileno (Figura 13.) y que es empleada para conexiones de datos industriales y automatización de procesos, así como conexión interna de sistemas de telecomunicación, conexiones de PC a periféricos, LAN, video digital, instrumentación médica, aislamiento de alta tensión, entre otras muchas aplicaciones.



Figura 13: Fibra óptica HFBR-RUS500

Dimensiones y características.

En la Tabla 4 se muestran las dimensiones y características de las fibras utilizadas (Véase también Figura 13).

Recubrimiento epoxi	Longitud Inicial (l ₀)	Diámetro Exterior (D)	Diámetro Interior (d)	Velocidad de pistón (v)
SI	100mm	2,2mm	0,99mm	1mm/min; 4mm/min; 8mm/min
NO	100mm	0,99mm	0,99mm	1mm/min; 4mm/min; 8mm/min

Tabla 4: Tabla de Dimensiones y Características Fibra en ensayo

Construcción de Probeta de Ensayo.

Se han probado tres tipos de probeta que se diferencian por el sistema de sujeción de la fibra con la chapa (Figura 14.).

- En la probeta de tipo T₁ se utilizan dos pares de chapas de aluminio que abrazan a la fibra en cada extremo ejerciendo en este caso las mordazas la presión sobre las dos chapas simultáneamente.
- En la probeta de tipo T₂ se adhiere la fibra a una única chapa de aluminio ejerciendo en este caso las mordazas la presión sobre la chapa sin afectar a la fibra.
- En la probeta de tipo T₃ se adhiere la fibra a dos chapas de aluminio de diferente tamaño, ejerciendo en este caso las mordazas la presión sobre una de las chapas y sirviendo la segunda chapa para garantizar un espesor determinado de adhesivo. Para la unión entre la fibra y chapas se utilizó el adhesivo ARALDIT.

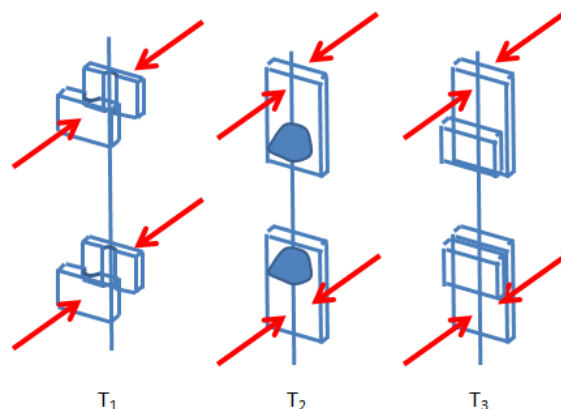


Figura 14: Tipos de sujeción fibra-chapa considerados

De los tres tipos de sujeción fibra-chapa se terminaría seleccionando el tipo T₃, ya que en los otros dos tipos se afectaba a la integridad de la fibra y, por tanto, a los resultados reales del ensayo.

Las probetas de tipo sujeción T₁ presentaron un problema de fabricación asociado a la dificultad de conseguir en cada una de las chapas un canal de 0,9/2 mm de profundidad para albergar en él a la fibra. En algunos de los ensayos con probetas de este tipo la presión de las mordazas dañó a la fibra llegando a cortarla; para paliar este problema, entre otras acciones, se redondearon las aristas de ambas chapas. Ante las dificultades surgidas se descartó el uso de este tipo de probetas. En el proceso de fabricación de las probetas de tipo T₂ surgió la dificultad de controlar el espesor de la lámina de adhesivo que, una vez polimerizado, quedaba entre la fibra y la chapa. Diferentes espesores daban lugar a diferentes estimaciones del módulo de elasticidad a partir de la gráfica tensión-deformación pues la propia deformabilidad de la lámina de adhesivo contribuía a la deformación del conjunto. Ante estas dificultades se descartó también el uso de este tipo de probetas. Las probetas de tipo T₃ no presentaron ninguno de los problemas citados y los ensayos realizados con ellas mostraron

muy poca dispersión. Es por ello que finalmente ha sido el tipo de sujeción utilizado.

Para ensayos de sujeción T_3 se llevaron a cabo tres tipos de ensayo (Figura 15.):

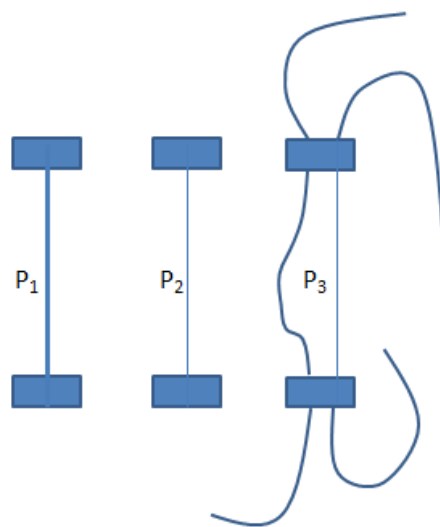


Figura 15: Tipo de Probeta

- a) Con una sola fibra (probetas P_1). De los ensayos de las probetas de tipo P_1 se obtendrán conclusiones relativas a la influencia del recubrimiento en el comportamiento mecánico de la fibra.
- b) Con una fibra a la que se le eliminó la cubierta protectora (probetas P_2). De los ensayos de las probetas de tipo P_2 se obtendrá la gráfica tensión-deformación del material de la fibra así como los valores de los principales parámetros mecánicos.
- c) Con dos fibras, ambas con tramos fuera de cada una de las placas de apriete (no sometido, por tanto, a tensión mecánica en el ensayo) y una de ellas de mayor longitud que la otra en el tramo entre placas (probetas P_4). De los ensayos de las probetas de tipo P_3 se establecerán relaciones

entre la tensión mecánica aplicada, el incremento térmico y la atenuación óptica de la fibra.

3.2.3. Máquina de Ensayo.

La máquina Universal de Ensayos fue la elegida para la ejecución del ensayo de tracción sobre la fibra POF. El funcionamiento de este tipo de máquina se basa en la sujeción del material a ensayar por medio de un par de mordazas, una en su parte superior y otra en su parte inferior. Sobre éstas se generan una sucesión de cargas en un tiempo determinado previo a la ejecución de la maniobra del ensayo mediante un sistema hidráulico integrado. El tiempo de generación de la carga y de ésta puede programarse previamente mediante un ordenador de control que dispone de un software de configuración y de obtención de datos. De éste se recoge un listado de cargas aplicadas en función del tiempo además de la deformación recogida por las galgas extensiométricas de la máquina, calculado por la diferencia de longitud (alargamiento) respecto la longitud inicial l_0 de la probeta de ensayo.

La máquina de universal de ensayos del laboratorio y utilizada para la obtención de datos tiene las siguientes características (Figura 16.).

- Marca: INSTROM
- Tipo: Servohidráulica.
- Modelo: 8802
- Capacidad de Carga Máxima: 250 kN



Figura 16: Máquina Universal de Ensayos INSTRON. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Mordazas de Ensayo de Tracción Fibra óptica.

Uno de los elementos de la máquina que tienen mayor influencia en el proceso de ensayo son las mordazas, tanto por el tipo como por el amarre sobre el material a ensayar. Una buena elección de esta sujeción de la probeta va a

otorgar una obtención de datos de ensayo más fiable y un análisis final, en definitiva, más acertado.

Las mordazas utilizadas en el laboratorio para la obtención de los datos que se dan lugar en este proyecto (Figura 17.), son de apriete superior e inferior sobre la probeta de fibra óptica ensayada. Estas mordazas disponen de una superficie dentada que da lugar a un mejor agarre y menores problemas de deslizamiento. A esto, y como se comentaba con anterioridad en la construcción de la probeta de ensayo, se le ha unido la colocación de dos pares de chapas de aluminio en cada extremo de la probeta de fibra a ensayar para protegerla del apriete ejercido por las mordazas (según sujeción T₃, véase también Figura 14.).



Figura 17: Mordazas de Máquina Universal de Ensayo del Laboratorio de la Universidad Carlos III de Madrid

3.2.4. Obtención y tratamiento de datos.

Los datos generados tras los ensayos realizados fueron trasladados desde el software de control de obtención de los mismos en formato “.txt” o texto, a formato “.xls” o Excel, donde finalmente se trabajaría con ellos. Estos datos representan:

- Tiempo, t (s), reflejando el tiempo en el que se producía la aplicación de carga y deformación sobre la probeta de fibra.
- Carga (kN), la fuerza de tracción ejercida a la fibra.
- Posición del pistón (mm), representando lo que se habría desplazado el pistón de aplicación de la carga sobre la probeta con respecto a una longitud inicial de referencia.
- Ciclo de ensayo.

Ya en el formato de cálculo “.xls” se procedió a eliminar y a tratar todos los valores residuales obtenidos y que no seguían la secuencia lógica del ensayo realizado. Uno de estos tratamientos consistió en sustituir puntos (.) por comas (,), para la correcta consideración del número decimal. Otros de los tratamientos fue reducir valores y secuencias tomando valores medios de un intervalo de datos determinado. Todo ello, para facilitar la representación final de datos y su análisis.

Tras el tratamiento previo de los datos obtenidos, se procedió con éstos al cálculo y representación de las tensiones y deformaciones ingenieriles (s , e), y consecutivamente con la tensiones y deformaciones verdaderas (σ , ϵ).

3.2.5. Caracterización mecánica de ensayos de tracción.

Como en toda caracterización mecánica de material que se precie, se ha llevado a cabo una serie de ensayos según un patrón de datos determinado para poder reflejar, por tanto, si la tendencia de ensayo es similar o varían según las condiciones de ensayo.

Para el estudio y análisis, deben evaluarse los datos de ensayo obtenidos en condiciones de Ley de Hook (13) (14), es decir, de Tensión y Deformación:

$$S = \frac{F}{A_0}; \text{ Tensión ingenieril (8)}$$

$$e = \frac{\Delta L}{L_0}; \text{ Deformación ingenieril (9)}$$

A partir de las dimensiones originales de la probeta, considerando la sección constante A_0 en toda su longitud, sobre el que se toma una base l_0 , y tras la medida del esfuerzo exterior F y del desplazamiento relativo entre extremos de dicha base Δl , se determinan las correlaciones anteriormente expuestas en **Valores Ingenieriles**, para cada instante del ensayo.

En cada caso específico, lo que interesa observar son las condiciones reales o verdaderas de caracterización del elemento, lo que se denomina **Valores Verdaderos** (Tabla 5.).

• Tensión ingenieril	$s = \frac{F}{A_0}$	s y σ coinciden en la zona elástica, pero no en la zona plástica
• Tensión verdadera	$\sigma = \frac{F}{A}$	

• Deformación ingenieril	$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$	l y ε coinciden solo en la zona elástica
• Deformación verdadera	$d\varepsilon = \frac{dl}{l} \Rightarrow \varepsilon = \ln \frac{l}{l_0}$	

Las def. ingenieriles NO son aditivas pero las verdaderas SI.

$l_0 \xrightarrow{e_1, \varepsilon_1} l_1 \xrightarrow{e_2, \varepsilon_2} l_2$	$e_T = \frac{\Delta l_T}{l_0} = \frac{l_2 - l_0}{l_0} ; \quad e_1 + e_2 = \frac{l_1 - l_0}{l_0} + \frac{l_2 - l_1}{l_1} \rightarrow e_T \neq e_1 + e_2$
	$\varepsilon_T = \ln \frac{l_2}{l_0} = \ln \left(\frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{l_1}{l_0} \right) = \ln \frac{l_2}{l_0} + \ln \frac{l_1}{l_0} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \Rightarrow \varepsilon_T = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$

Tabla 5: Tensión y Deformación: Valores Ingenieriles a Valores Verdaderos

Para el caso de conservación volumétrica ($V \equiv \text{cte}$) de la probeta, se reducen las expresiones de cálculo según lo expuesto en la Tabla 6.

$l_0 A_0 = l A \Rightarrow \frac{l}{l_0} = \frac{A_0}{A} \Rightarrow \varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A}$		
$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{l + l_0 - l_0}{l_0} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right) = \ln(1 + e) \\ \sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{A_0}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{l}{l_0} = s \frac{l}{l_0} = s(1 + e) \end{array} \right.$		
$\boxed{\begin{array}{l} \varepsilon = \ln(1 + e) \\ \sigma = s(1 + e) \end{array}}$	\Leftrightarrow	$\boxed{\begin{array}{l} e = \exp(\varepsilon) - 1 \\ s = \sigma \exp(\varepsilon) \end{array}} \quad \begin{array}{l} \varepsilon < e \\ \sigma > s \end{array}$

Tabla 6: Valores Ingenieriles y Verdaderos $V \equiv \text{cte}$

Mediante el cálculo de su valores tensionales y de deformación, según las fórmulas expuestas con anterioridad, y su representación gráfica posterior, pudo determinarse su caracterización mecánica de la fibra (Figura 18.).

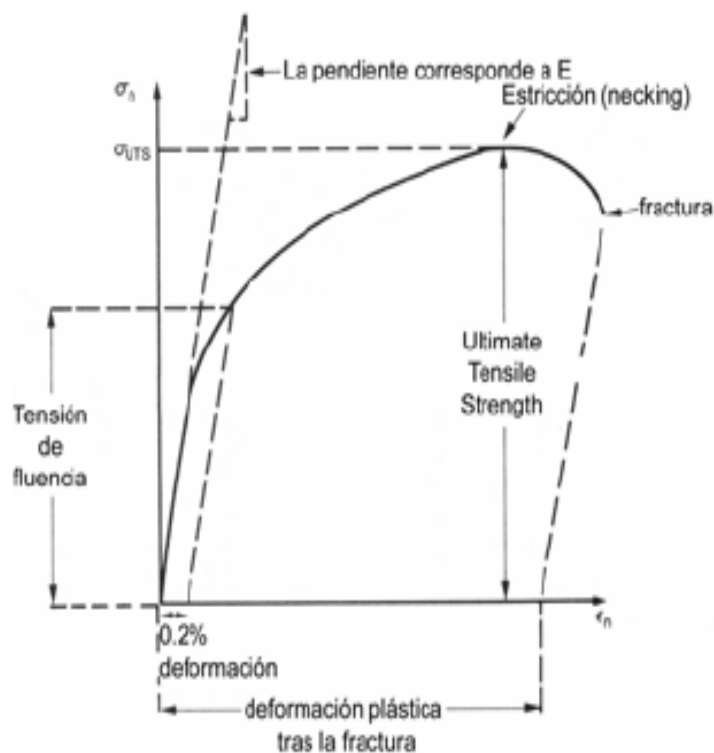


Figura 18: Caracterización de Curva Tensión vs Deformación

Modulo elástico o modulo de Young, E.

El tramo inicial de la curva, que generalmente es recto, da información del comportamiento elástico del material, es decir sobre la relación entre esfuerzos y deformaciones cuando estas son recuperables. La pendiente de este tramo inicial de la curva es una medida de rigidez del material. De dos piezas con la misma geometría, sometidas a la misma sollicitación mecánica y fabricadas con diferentes materiales que trabajen dentro del campo elástico, aquella con mayor modulo, será la que presente menores deformaciones (ver Figura 19).

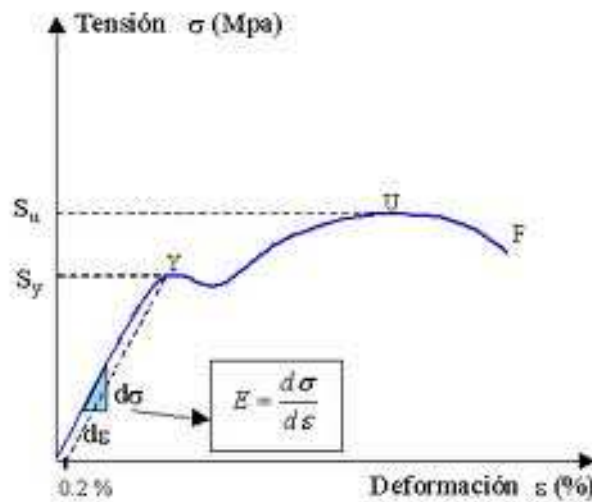


Figura 19: Módulo de Young, E (MPa)

En su cálculo matemático (10), se define como la constante de proporcionalidad entre tensión aplicada y deformación resultante dentro del régimen elástico.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\Delta l/l} \rightarrow [E] \equiv Pa \quad (10)$$

El límite elástico, ε_p .

Es la tensión mínima que hay que aplicar para que aparezcan deformaciones permanentes en el material y que puede calcularse como la tensión que produce en el material una deformación ingenieril del 0,2%. (Véase *punto a*, en Figura 20.).

La resistencia a la tracción ó tensión de rotura, R_m .

Coincide con el valor máximo del esfuerzo y es la tensión que hay que aplicar para que se produzca la rotura de la probeta en las condiciones del ensayo.

Ésta sufre una reducción localizada de sección, provocando un aumento de tensión y de alargamiento en esa localización (zona del “cuello”), provocando la caída de la tensión nominal. Este proceso continúa hasta que la sección no es capaz de seguir deformándose y se produce la fractura. La carga de rotura es una propiedad que también se puede utilizar para el cálculo de piezas que trabajan sometidas a esfuerzos aunque, en la actualidad, se tiende a emplear preferentemente el límite elástico (Véase *punto d*, en Figura 20.).

El alargamiento a la rotura, $\Delta\epsilon_t$.

Es la extensión que presenta la probeta tras el fallo. Esta propiedad es una medida indirecta de la ductilidad del material. Un alargamiento a la rotura elevado es una propiedad deseable porque los materiales con esta propiedad admiten deformaciones plásticas importantes, cuya observación, en muchas ocasiones, permite adoptar medidas correctoras con anterioridad a la fractura. Además, el alargamiento a la rotura es también un indicador de la capacidad del material para ser conformado por deformación a la temperatura de ensayo.

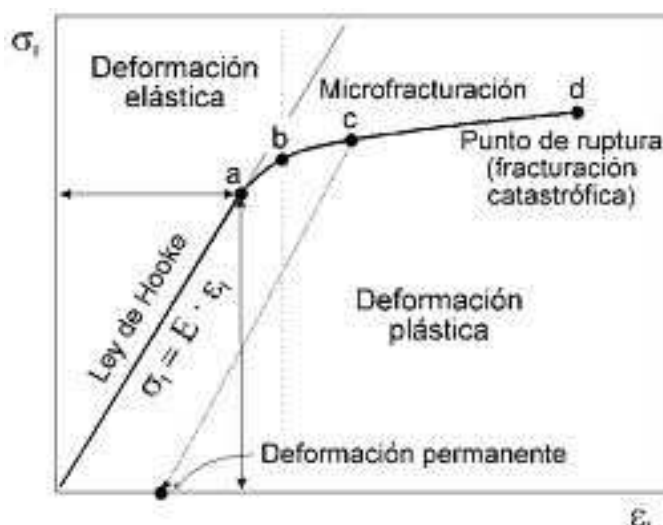


Figura 20: Representación de parámetros principales en la curva mecánica característica

3.3 Medición experimental del ΔT por técnicas de termografía infrarroja.

Se decía anteriormente que parte de la energía generada en la deformación de un material se convierte en energía calorífica, según la expresión (1). Esta energía calorífica viene determinada por la variación de temperatura en la superficie de la probeta, la cual, a su vez, es medida por medio de una Cámara Infrarroja. Éste se trata de un dispositivo que, a partir de las emisiones de infrarrojos medios del espectro electromagnético de los cuerpos detectados, forma imágenes luminosas visibles por el ojo humano. Estas cámaras operan, más concretamente, con longitudes de onda en la zona del infrarrojo térmico, que se considera entre 3 μm y 14 μm .

La Cámara IR utilizada en el proyecto es la FLIR SC600. Se trata de una cámara infrarroja no refrigerada y de alta sensibilidad a de toma de datos. Además establece una conexión al PC que contiene un poderoso software termográfico para la grabación y el análisis en tiempo real (ver Figura 21.).



Figura 21: Cámara infrarroja FLIR SC600

Los datos técnicos característicos de la cámara FLIR SC600 se representan en la Tabla 7. que se expone a continuación:

- Material del sensor: Sia (Silicón Amorfo).
- Resolución Pixel: 640x480 25 μm .
- Respuesta Espectral: 7,5 μm – 13,5 μm .
- Sensibilidad Térmica (NETD): < 30 mk.
- Frecuencia de Imagen: 30 Hz.
- Salida Digital: Firewire.
- Rueda de Filtro: No.

Tabla 7: Características técnicas de la Cámara IR FLIR SC600

3.3.1. Dispositivos y materiales de laboratorio para la calibración de la Cámara Infrarroja.

Para abastecer las condiciones de funcionalidad del proceso de adquisición de datos, es necesaria una previa calibración de la Cámara Infrarroja utilizada (Véase Anexo 1). A continuación, se describen y se detallan cada uno de los equipos y su importancia dentro del proceso (Ver Figura 22.).

- Cámara Infrarroja (IR).
- Cámara de Ensayos.
- Resistencia Térmica u Hornillo.
- Controlador de temperatura.

- Sensor de Medida o Termopar.
- Cámara Oscura.
- Soporte sistema prueba IR-Oscura.
- PC.



Figura 22: Panorámica completa de Laboratorio de medición de ΔT por técnicas Infrarrojas Cámara de ensayos.

Cámara de Ensayos.

Los ensayos térmicos de la calibración previa se desarrollaron en el interior de una caja metálica de acero inoxidable, con las dimensiones 340 x 290 x 235 mm, lo que se denominaría *Cámara de Ensayos*.

Esta caja fue provista de un material de aislamiento térmico en sus paredes interiores, con el objetivo de evitar una transferencia del calor generado al exterior y que, por tanto, garantice una correcta medida del incremento térmico. También queda provista de una *Resistencia Térmica* de 1500 W, alimentada por red a 220V, para generar ese incremento térmico requerido en el interior. Dicha

caja dispone de un orificio por el cual se tomaran los datos de adquisición mediante la Cámara Infrarroja (*Cámara IR*), con coincidencia geométrica con la lente de dicha cámara de toma de datos (Ver Figura 23.)



Figura 23: Cámara de ensayos

En su pared lateral, se realizó otro orificio de diámetro inferior que el principal, por el cual se introduciría el *Controlador de Temperatura* y el *Termopar* (Ver Figura 24.).



Figura 24: Interior Cámara de ensayos

Resistencia térmica u Hornillo.

La Resistencia Térmica de 1500 W, cuya placa térmica de calentamiento fue extraída de un hornillo eléctrico convencional (ver Figura 25.) e instalada en la Cámara de ensayos de calibración (ver Figura 26.), proporcionando el aumento de temperatura requerido en el interior de dicha cámara. Este Hornillo o resistencia fue controlado y ajustado mediante un Controlador eléctrico de temperatura.



Figura 25: Hornillo Eléctrico convencional



Figura 26: Acoplamiento de resistencia eléctrica en Cámara de ensayos.

Controlador de Temperatura.

Es el responsable de regular la temperatura de la Resistencia Térmica y, por tanto, del interior de la Caja Metálica o Cámara de ensayos. Porta un regulador digital de temperatura P.I.D. (Proporcional Integral Derivativo) que permite limitar o fijar la temperatura requerida (Set Point), así como un indicador de la temperatura real existente por medio de un sensor de medida (Termopar) en la zona de medición. Alimentado por red a 220V (Ver Figura 27.).



Figura 27: Controlador de temperatura.

Sensor de Medida o Termopar 2.

Denominaremos como Termopar 2, al sensor de medida de temperatura que se colocó para comprobar y contrastar las medidas de temperatura tomadas por el termopar perteneciente al Controlador de Temperatura (misma entrada de medición = orificio lateral Cámara de Ensayo).

En un inicio, el sensor de medida o termopar 2 quiso colocarse pegado a la Resistencia Calorífica u Hornillo, pero se comprobó que las medidas de

temperatura quedaban influenciadas elevándose drásticamente debido al calentamiento del propio cable del sensor (ver Figura 28.).

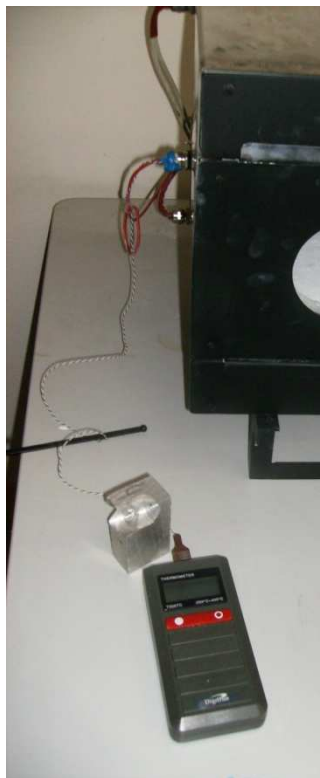


Figura 28: Termo par en interior Cámara de ensayos conectado a dispositivo digital de medición.

Cámara Oscura.

Las dimensiones de esta cámara (o más bien se podría considerar un conducto rectangular por su forma), diseñada específicamente en relación a las medidas de la Cámara IR utilizada en el proyecto, son de 1000 mm de largo, 236 mm de alto y 176 mm de ancho. Interiormente existe un orificio de 86 mm de diámetro, suficiente para que la cámara IR realice tomas de ensayo (Ver Figura 29.).



Figura 29: Cámara Oscura del laboratorio

La función concreta de la cámara es aislar el ensayo de radiaciones exteriores que puedan desvirtuar los resultados del mismo. Se intentó conseguir, de esta manera, que la *Emisividad* fuera muy próxima a la de un cuerpo negro ($\epsilon=1$).

Soporte de Cámara Oscura.

Se utilizó un soporte de madera para la estabilidad de la cámara oscura, cuyas dimensiones fueron de 1000 mm de largo, 400 mm de ancho y 80 mm de altura. Proporciona al sistema de ensayo un equilibrio estructural y dimensional. Su material de composición es la madera.

PC.

Computador PC portátil, el cual va provisto del software de análisis y grabación de alta potencia en tiempo real de toma de imagen. Su conexión con la Cámara IR es mediante USB (Ver Figura 30.).



Figura 30: PC con software de visualización de datos

3.3.2. Procedimiento por etapas en el laboratorio.

El operativo de medición de toma de datos previa calibración, se detalla en las siguientes etapas:

Etapas 1.

- Preparación de material y equipos del laboratorio. Se hace uso de equipos del mercado, un hornillo calorífico, que nos permitiría calentar la fibra y observar el comportamiento que sufre el material al acercarle a un foco caliente y provocarle un incremento térmico. Para ello, y como se ha explicado anteriormente, se desmontó la placa generadora de calor de un hornillo convencional para su colocación posterior en la parte trasera de la caja oscura (Ver Figura 31.).



Figura 31: Montaje Placa calorífica en Caja Oscura

A esto se le añadió la alimentación requerida para la generación de calor, mediante el *Controlador de Temperatura*. Este equipo a su vez, regula la temperatura de la placa interna en la caja mediante una botonera que queda reflejado en un display digital. A esto le complementa, una *sonda de temperatura*, *Sensor de Medida de T^a o Termopar*, el cual se coloca en el interior de la caja, para comprobar la variación de temperatura teórica y la real del sistema.

Finalmente, y para cerrar la etapa de preparación de los equipos de laboratorio, se instalan los dispositivos de la Cámara IR junto con su conexión a PC por USB, en el que se encuentra integrado el software de la misma, *RTools HSDR FLIR SISTEMAS 2.3 SR-1*, para la obtención y análisis de los datos obtenidos.

Etapa 2.

- Pruebas de contacto con software y de calibración de equipos del sistema. Para las pruebas a realizar, previamente se realizaron pruebas de funcionamiento y verificación de datos, observándose si estos llegaban al PC desde la Cámara correctamente. Tras verificarlo, se procedió a colocar la Cámara Oscura frente a la Caja Oscura realizándose las pruebas y calibraciones de los diferentes equipos (Figura 32.).



Figura 32: Pruebas con Cámara Oscura-Caja Oscura

Para impedir el paso de luz de ambiente que pudiera contaminar el proceso de calibración, se colocaron diferentes secciones de tela de color negro en aquellas zonas que así lo requiriesen.

Etapa 3.

- Prueba final. La etapa final aglutina la base del estudio desarrollado en este documento: conocimiento de comportamiento termoelástico y fotoelástico de la fibra óptica plástica.



3.4. Medición de la Potencia Óptica.

Para la medición de la potencia óptica durante el proceso de deformación de la POF se transmitió energía a lo largo de la fibra mediante un sistema receptor-emisor de ondas de luz en toda su longitud. La medida de la variación de tensión transmitida en el recorrido de la fibra determinaría la atenuación óptica de ésta durante su deformación (Véase Figura 9. Esquema del Ensayo).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Los resultados obtenidos se fundamentaron en la realización y comparación de diferentes ensayos de tracción cuasi-estáticos en control de posición con medida simultánea del incremento de temperatura en la superficie de la probeta y de la potencia óptica transmitida. Por cada uno de estos ensayos se llevaron a cabo, a su vez, tres repeticiones, de los cuales no se visualizaron diferencias estadísticamente relevantes.

También se han realizado ensayos a diferentes velocidades de deformación, para conocer la influencia del aumento de la velocidad del proceso dentro de un régimen cuasi-estático, y así como ensayos de relajación viscoelástica, para observar el comportamiento de la fibra al mantener la deformación constante.

4.1. Comportamiento a tracción de la fibra sin cubierta.

Se han llevado a cabo ensayos cuasi-estáticos con control de desplazamiento (velocidad de desplazamiento del cabezal constante), de probetas de tipo P₂, es decir, de fibra sin cubierta plástica protectora. Para analizar la posible dispersión de resultados se ensayaron tres probetas resultando estadísticamente irrelevantes las diferencias existentes entre las gráficas y parámetros mecánicos obtenidos.

Gráfica tensión verdadera vs deformación verdadera

En la Figura 33 se muestra, como ejemplo, la gráfica σ - ϵ obtenida en uno de los ensayos en el que la velocidad del cabezal fue de 4 mm/min alcanzándose una velocidad de deformación de 0,0005 s⁻¹, según ϵ - t , Figura 34. En los 780 s de duración del ensayo hasta la rotura de la fibra, se registraron hasta 7800 pares de valores de la carga y elongación temporalmente consecutivos.

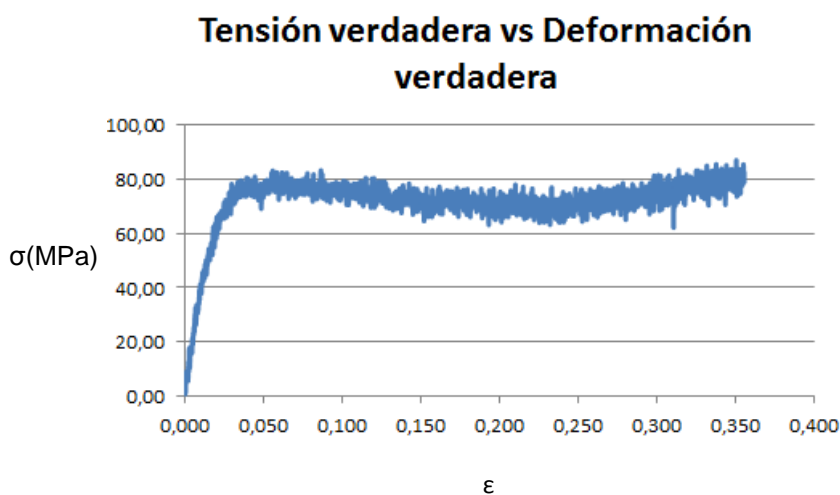


Figura 33: Gráfica σ - ϵ

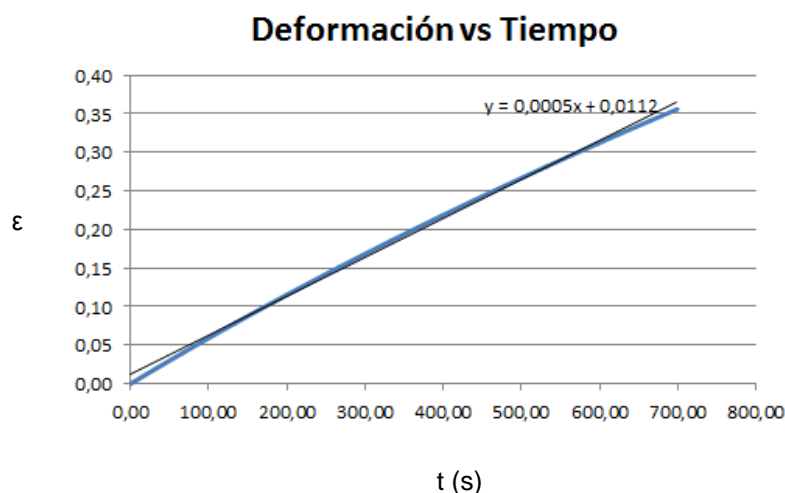


Figura 34: Gráfica $\varepsilon - t$

La gráfica de la Figura 33. muestra las tres regiones definidas por el comportamiento de las cadenas moleculares poliméricas y es similar a la obtenida para POF, por Jiang, 2002.

Consideraciones de deformabilidad de la fibra

Para valores bajos de la tensión, las cadenas moleculares, que forman inicialmente una madeja, sufren progresivamente desplazamientos relativos bajo la acción de la tensión alejándose de su estado de equilibrio inicial y alcanzando posiciones relativas inestables; las fuerzas intermoleculares que las mantienen unidas equilibran a la tensión aplicada, por lo que, cuando se elimina la carga, las cadenas recuperan prácticamente su posición inicial debido a las fuerzas intermoleculares que las unen. En esta situación tensional, que se produce para valores de la deformación de $\varepsilon < 0,03-0,04$, se dice que el material tiene un comportamiento elástico.

Al incrementar el valor de la carga (a partir de una deformación $\varepsilon \approx 0,03-0,04$, es decir, una vez superado el límite de elasticidad), las fuerzas intermoleculares no pueden equilibrar a la tensión, por lo que al aumentar ésta se producen

desplazamientos relativos entre cadenas, las cuales alcanzan posiciones relativas estables y, en consecuencia, deformaciones permanentes (plásticas). Este proceso implica un debilitamiento (ablandamiento) del material que manifiesta en la pendiente negativa de la gráfica tensión-deformación. Durante esta fase, las deformaciones permanentes pueden crecer mucho sin apenas variación de tensión aplicada; este hecho implica que el material es capaz de absorber gran cantidad de energía por deformación.

El desplazamiento relativo de las cadenas moleculares hasta posiciones estables va acompañado de la progresiva orientación de éstas en la dirección de aplicación de la carga. Hasta una deformación de $\varepsilon \approx 0,20-0,25$, la pendiente de la curva disminuye suavemente, correspondiendo esta disminución con el hecho de que el proceso de desplazamiento relativo de las cadenas prima sobre el de su orientación. En $\varepsilon \approx 0,20$ la curva muestra un punto de inflexión cambiando su concavidad; este valor de la deformación puede establecerse como frontera entre el estado tensodeformacional en el que las cadenas moleculares están mayoritariamente alcanzando posiciones relativas (produciéndose deformaciones permanentes en el material) y el estado tensodeformacional en el que las cadenas empiezan mayoritariamente a orientarse en la dirección de aplicación de la carga. Cuando la mayor parte de las cadenas moleculares están ya orientadas se produce entonces un endurecimiento progresivo del polímero lo que se manifiesta en la pendiente positiva de la rama última (región de endurecimiento) de la gráfica tensión-deformación (Figura 33).

Se define como *deformación de rotura* el valor de la deformación que presenta la probeta tras el fallo; esta propiedad es una medida indirecta de la ductilidad del material. Como valor medio de los valores obtenidos en los diferentes ensayos se ha obtenido una deformación de rotura $\varepsilon_R = 0,35$.

Módulo de Young

El módulo de Young tangente (instantáneo inicial) se ha obtenido ajustando una línea recta a la rama elástica de la gráfica σ - ϵ obtenida en cada uno de los ensayos realizados. Los valores obtenidos fueron $(E_{\text{tan}})_1 = 3822 \text{ MPa}$, (Figura 35), $(E_{\text{tan}})_2 = 3612 \text{ MPa}$ y $(E_{\text{tan}})_3 = 3297 \text{ MPa}$, y cuyo valor medio de todas ellas es $E_{\text{tan}} = 3577 \pm 215 \text{ MPa}$.

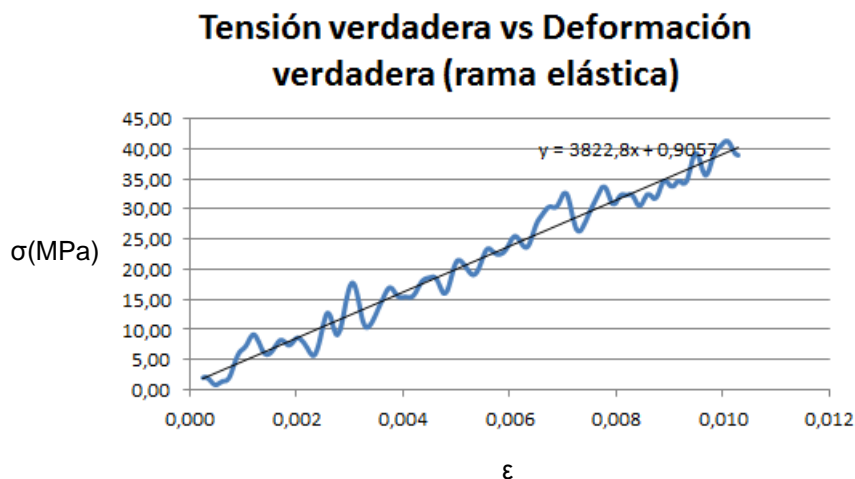


Figura 35: Determinación del Módulo de Young

Para conocer la evolución del módulo de Young con la deformación, evolución que es una estimación de las variaciones sufridas en la estructura molecular del material que se deforma, se han llevado a cabo ensayos con procesos de carga-descarga. En cada uno de estos procesos la pendiente de la rama de descarga (descarga elástica) es el valor del Módulo de Young cuando el material ha alcanzado la deformación correspondiente al inicio de la descarga. En la Figura 36 se muestra, como ejemplo, la gráfica σ - ϵ obtenida en uno de los ensayos con descargas.

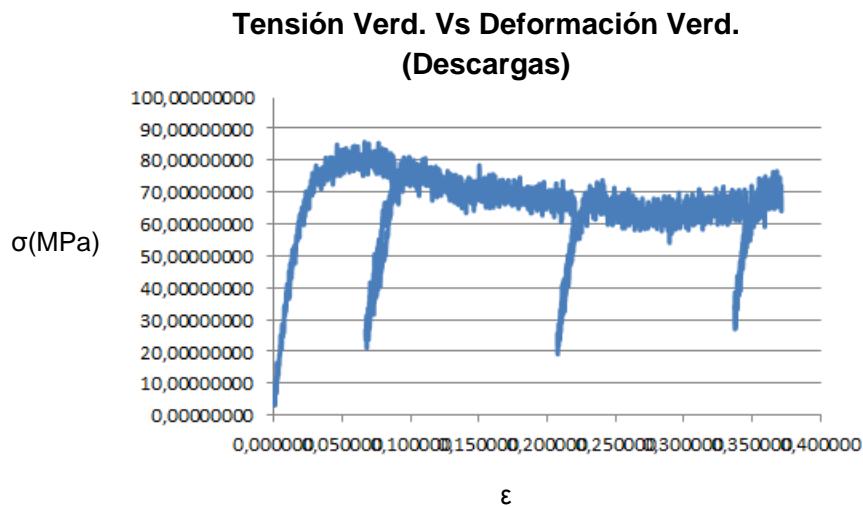


Figura 36: Gráfica σ - ϵ obtenida en un ensayo con procesos de carga-descarga de probetas tipo P2

En cada conjunto de valores registrados correspondientes a un proceso de carga-descarga, se ajustó una línea recta, siendo esta recta la pendiente que da valor al Módulo de Young del material correspondiente a la deformación al inicio de la descarga. En la Figura 37. se muestra las pendientes de las tres descargas realizadas. Los valores obtenidos para la misma deformación en diferentes ensayos resultaron muy similares de forma tal que en la gráfica los puntos correspondientes están superpuestos.

En la Figura 38. se muestra la gráfica de la función polinomial (11), obtenida por interpolación en los puntos (E , ϵ) obtenidos en las descargas.

$$E = -22082\epsilon^3 + 148256\epsilon^2 - 25788\epsilon + 5474 \quad (11)$$

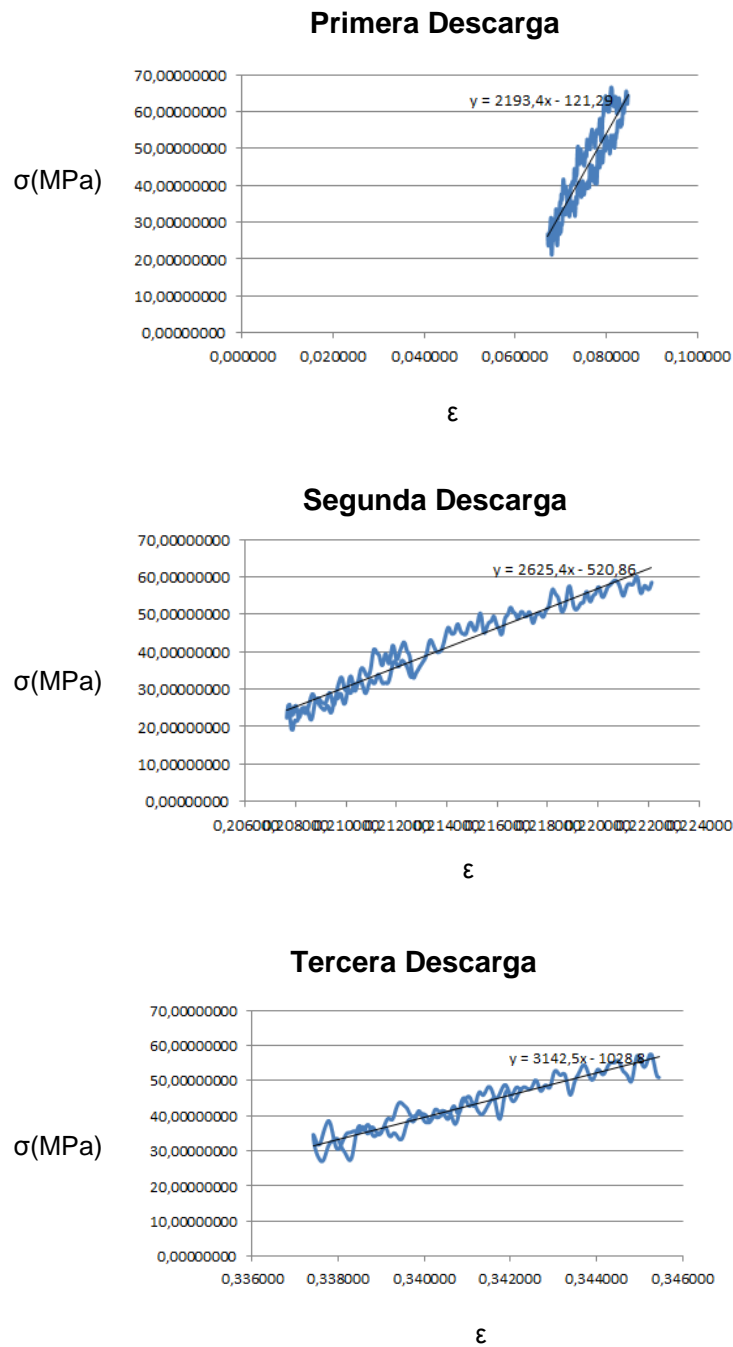


Figura 37: Pendientes de las descargas con la deformación

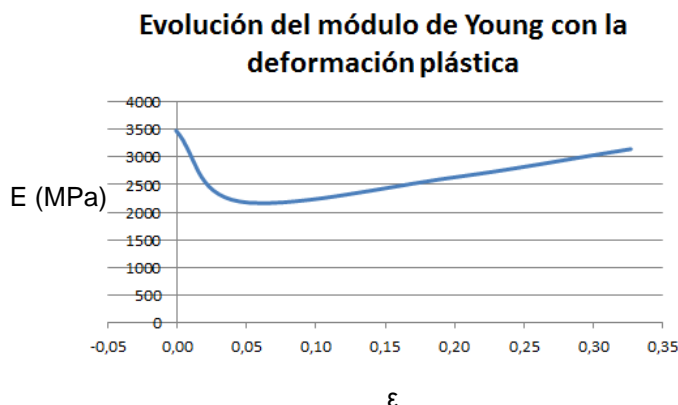


Figura 38: Evolución del módulo de Young con la deformación

En la gráfica de la Figura 38 se observa un descenso inicial rápido del módulo de Young que está asociado a la rotura de los enlaces de las cadenas moleculares y al correspondiente desenredamiento de éstas (Primera descarga). Cuando las cadenas empiezan a estirarse, la rigidez del material aumenta, (Segunda Descarga), hasta que las cadenas moleculares alcanzan su máxima elongabilidad, situación en la que el módulo de Young alcanza su valor máximo (Tercera descarga).

Límite de elasticidad

Se define el Límite de Elasticidad ó Fluencia, σ_y , como el valor mínimo de la tensión bajo la cual se producen deformaciones plásticas (irreversibles) al retirar la carga. Aunque esta definición es aceptable para metales. En el caso de los materiales poliméricos no es tan clara.

En muchos casos, σ_y corresponde con la ordenada de la carga máxima en la gráfica σ - ϵ . Según esta primera consideración, los valores del límite de

elasticidad obtenidos en los diferentes ensayos realizados fueron: $(\sigma_y)_1 = 78$ MPa, $(\sigma_y)_2 = 78$ MPa y $(\sigma_y)_3 = 75$ MPa, cuyo valor medio es $\sigma_y = 77$ MPa.

Un segundo procedimiento para la estimación del límite de elasticidad consistió en ajustar las rectas pendiente generadas del tramo elástico (Figura 35.) y del tramo sensiblemente recto al inicio de la rama elastoplástica (Figura 39.), resultando entonces el límite de elasticidad la ordenada del punto intersección de ambas rectas.

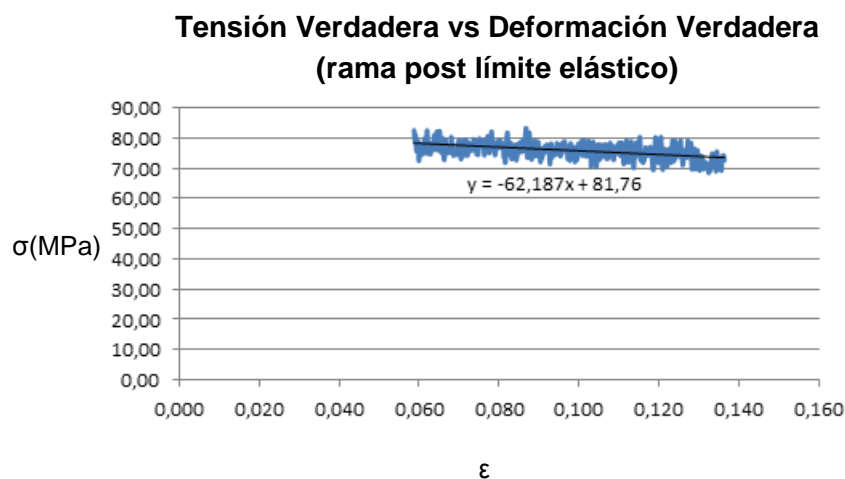


Figura 39: Determinación gráfica del límite de elasticidad (rama Elastoplástica)

Según este procedimiento, los valores del límite de elasticidad obtenidos en los diferentes ensayos realizados fueron $(\sigma_y)_1 = 80,5$ MPa, $(\sigma_y)_2 = 79,3$ MPa y $(\sigma_y)_3 = 78$ MPa, cuyo valor medio es $\sigma_y = 79,3$ MPa, resultado que no difieren en exceso con respecto al obtenido con el primer procedimiento.

Componentes elástica y plástica de la deformación

Aceptando la descomposición aditiva de la deformación, la componente plástica se ha podido obtener mediante la expresión $\varepsilon^p = \varepsilon - \frac{\sigma}{E}$, así como ambas, elástica y plástica, de la Figura 38.

En las Figuras 40. y 41., por tanto, quedan representadas las curvas de la evolución temporal de la deformación elástica y plástica, respectivamente.

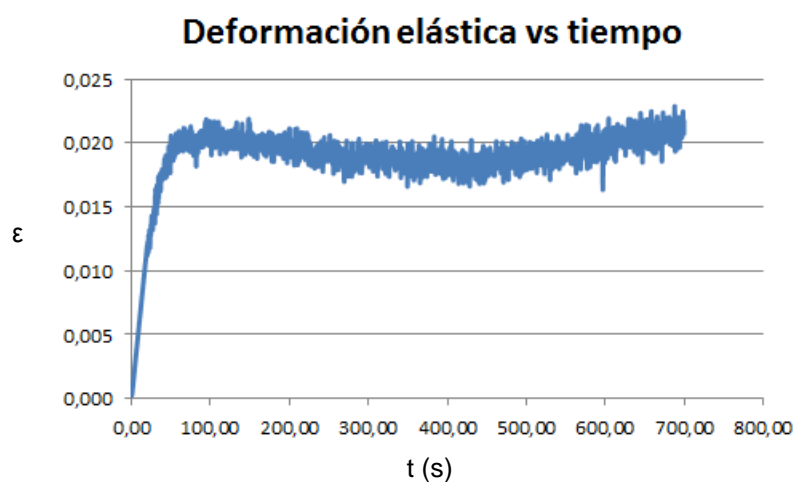


Figura 40: Gráficas ε^e-t

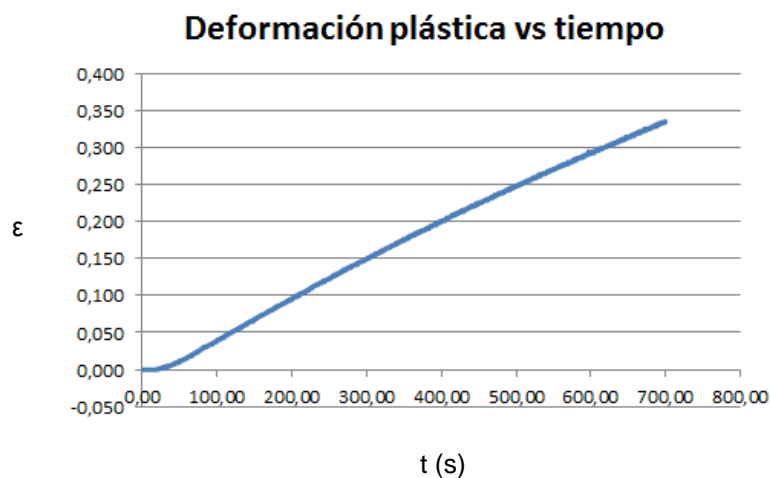


Figura 41: Gráficas ε^p-t

Las gráficas de las Figuras 40. y 41. muestran que la componente elástica de la deformación es menor que la componente plástica. Al principio del ensayo el material alcanza su límite de elasticidad a partir del cual la deformación elástica prácticamente se estabiliza ($\epsilon \approx 0,02$) lo que sugiere que las fuerzas moleculares que unen a las cadenas prácticamente han sido anuladas. La deformación plástica, sin embargo, aumenta, lo que sugiere un desenredamiento de las cadenas moleculares hasta alcanzar su máxima elongabilidad.

Resistencia a la tracción

Se define “Resistencia a la tracción” ó “Resistencia Última” como el valor de la tensión nominal correspondiente al valor de la tensión verdadera para el cual se cumple el *Criterio de Considère* (12),

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma \quad (12)$$

En la Figura 42. se muestra, como ejemplo, la gráfica σ - ϵ de uno de los ensayos reducida al tramo de endurecimiento previo a la rotura. A esta rama se ha ajustado un polinomio de 2º grado, a partir del cual se ha aplicado la hipótesis de Considère, resultando que, para un valor de la deformación $\epsilon=0,324$, la tensión de rotura o a tracción aplicada es $\sigma= 85$ MPa. Los valores obtenidos en todos los ensayos realizados bajo las mismas condiciones, resultaron muy similares,

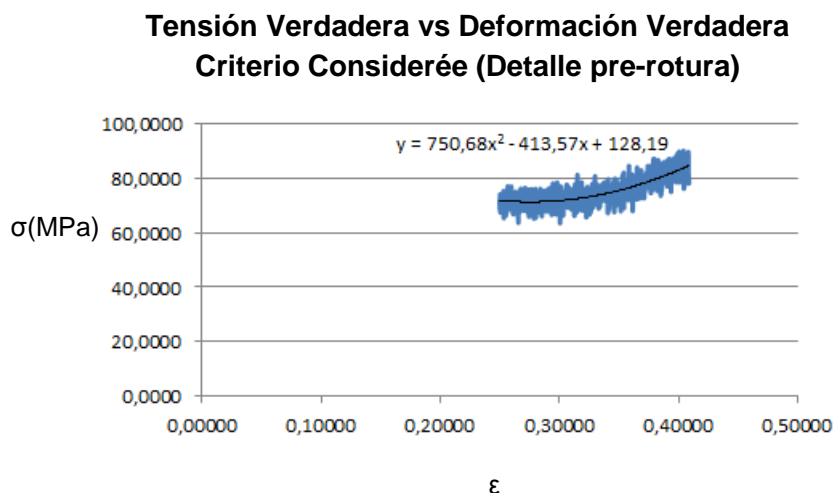


Figura 42: Tramo de la gráfica σ - ε previa a la rotura.

4.2. Comportamiento a tracción de la fibra con cubierta.

Para comprobar la aportación de la cubierta protectora a la resistencia de la fibra se llevaron a cabo, de la misma manera, ensayos a la misma velocidad de desplazamiento de probetas de tipo P₁, es decir con recubrimiento, y una longitud inicial de la probeta de 150 mm. En cada ensayo se ha obtenido la correspondiente gráfica S- $\Delta L\%$. Para analizar la posible dispersión de resultados se ensayaron, como para cada uno de los ensayos, tres pruebas que resultaron estadísticamente irrelevantes.

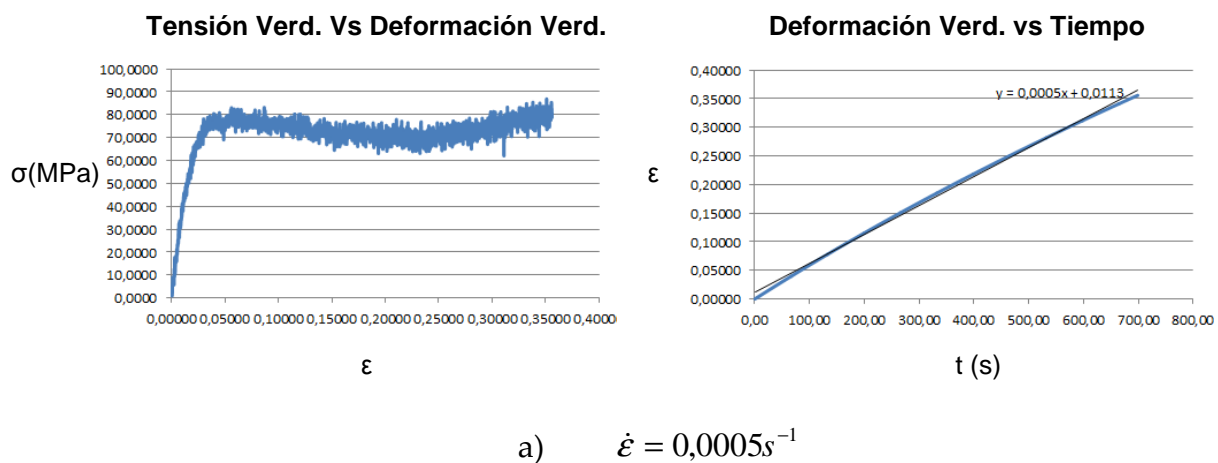
La observación post-mortem de las fibras ensayadas evidenció, por otra parte, la deformación local del recubrimiento en la zona de rotura pero no la aparición de cuello de estrangulación en el núcleo.

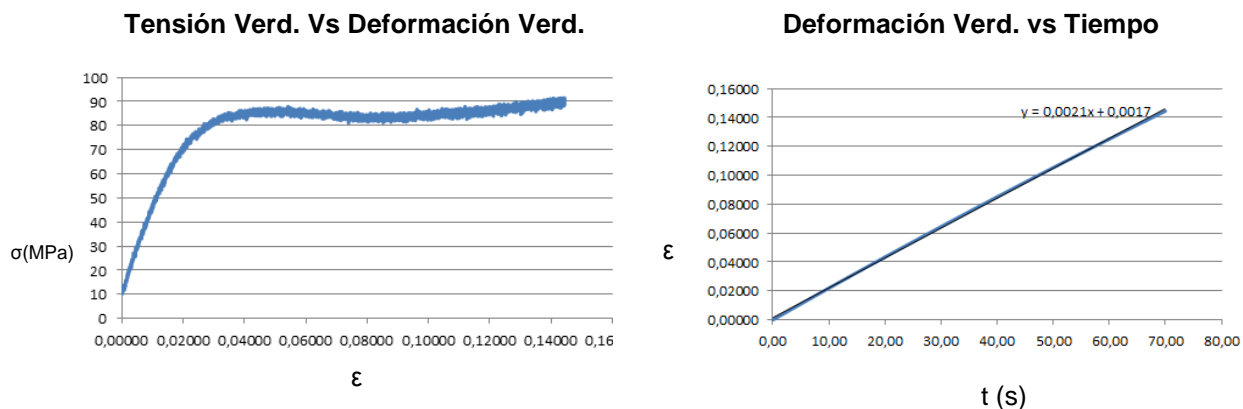
La gráfica S- $\Delta L\%$ obtenida se comparó con la correspondiente gráfica obtenida en los ensayos de probetas P₂ (sin recubrimiento) resultando ambas muy similares. Se deduce por esto que la influencia del recubrimiento en la rigidez

de la fibra a tracción es despreciable. De igual manera, el Módulo de Young resultó muy cercano, lo que contrastó, más si cabe, la escasa contribución del recubrimiento al comportamiento elástico de la fibra.

4.3. Influencia de la velocidad de deformación en el comportamiento a tracción del núcleo de la fibra.

Para comprobar la posible influencia de la velocidad de deformación en el rango de velocidades correspondientes a ensayos cuasi-estáticos, se llevaron a cabo ensayos de probetas de tipo P₂, es decir, de fibra sin recubrimiento, a diferentes velocidades de desplazamiento del cabezal de la máquina. En la Figura 43. se muestran las gráficas σ - ϵ y ϵ -t obtenidas en ensayos cuasiestáticos en los que se alcanzó una velocidad de deformación de 0,0005 s⁻¹, a), y 0,0021 s⁻¹, b), respectivamente.





b) $\dot{\epsilon} = 0,0021 \text{ s}^{-1}$

Figura 43: Gráficas σ - ϵ y ϵ - t obtenidas en ensayos de probetas en los que se alcanzaron diferentes velocidades de deformación: $0,0005 \text{ s}^{-1}$ a), $0,0021 \text{ s}^{-1}$ b).

En la Tabla 8. se incluyen los valores del módulo de elasticidad, límite elástico y resistencia máxima deducidos de las gráficas tensión verdadera vs deformación verdadera mostradas para diferentes velocidades de ensayo en la Figura 43.

Parámetro	$0,0005 \text{ s}^{-1}$	$0,0021 \text{ s}^{-1}$
Módulo de Young (MPa)	3600	3800
Límite elástico (MPa)	77	85
Resistencia máxima (MPa)	85	90
Deformación de rotura	0,35	0,14

Tabla 8: Parámetros mecánicos y velocidad de deformación

De los valores mostrados en la Tabla 9. se deduce que, al aumentar la velocidad de deformación, también lo hace así el Módulo de Young, el límite elástico y la resistencia máxima, mientras que, en cambio, provoca la disminución de la deformación de rotura (rompe antes).

4.4. Comportamiento víscido de la fibra.

Por ser el material del núcleo de la fibra un polímero cabe esperar en él un comportamiento víscido que no puede describirse con las teorías clásicas de la Elasticidad o de la Plasticidad ni con la de los fluidos viscosos.

En los materiales elásticos los estados de tensión y de deformación están biunívocamente relacionados. En los materiales víscidos la relación entre tensión y deformación no es biunívoca: depende de la historia de los estados de tensión y deformación por los que el material ha pasado. Los estados de deformación y tensión no se estabilizan al mismo tiempo pero los valores que alcanzan una vez estabilizados se corresponden biunívocamente.

Los fenómenos de Fluencia y Relajación constituyen la manifestación fenomenológica del comportamiento víscido. Se dice que el material sufre un proceso de Fluencia cuando sometida una probeta a una carga constante, la deformación instantánea inicial aumenta en el tiempo. Se dice que el material sufre un proceso de Relajación cuando sometida una probeta a una deformación constante, la tensión instantánea inicial disminuye en el tiempo.

La fluencia de un material queda caracterizada por la función de fluencia, $J(t)$, que representa la evolución temporal de la deformación correspondiente a una tensión aplicada constante igual a 1. La relajación de un material queda caracterizada por el módulo de relajación, $Y(t)$, que representa la evolución temporal de la tensión correspondiente a una deformación aplicada constante igual a 1.

Para estimar la función de fluencia y el módulo de relajación se han llevado a cabo ensayos de relajación. La probeta tenía una longitud inicial de 108mm. El ensayo consistió en someter a la probeta a un alargamiento forzado creciendo en rampa desde 0 hasta un valor establecido, ΔL_v , y mantener la probeta sometida a ese alargamiento durante un tiempo de 2 horas.

En laS Figura 44. y 45. se muestra la evolución temporal de la deformación y de la tensión, respectivamente, obtenidas en el mismo ensayo con $\Delta L_v=1,8$ mm (que corresponde con una deformación verdadera de 0,017) alcanzado en 27 s, lo que implica una velocidad de deformación de $0,006 \text{ s}^{-1}$.

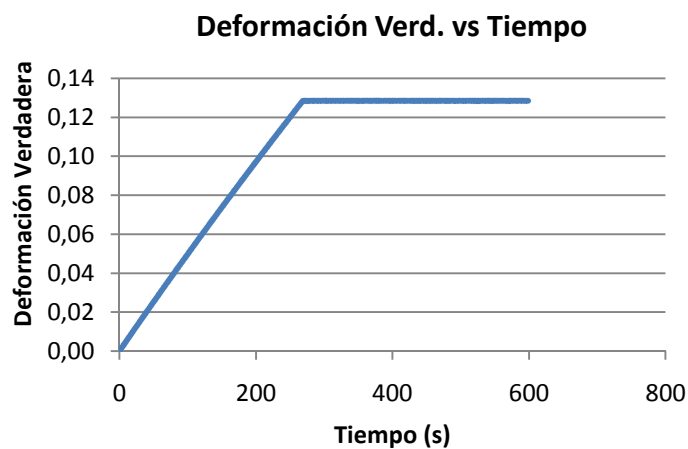


Figura 44: Gráfica ϵ - t impuesta en un ensayo de relajación

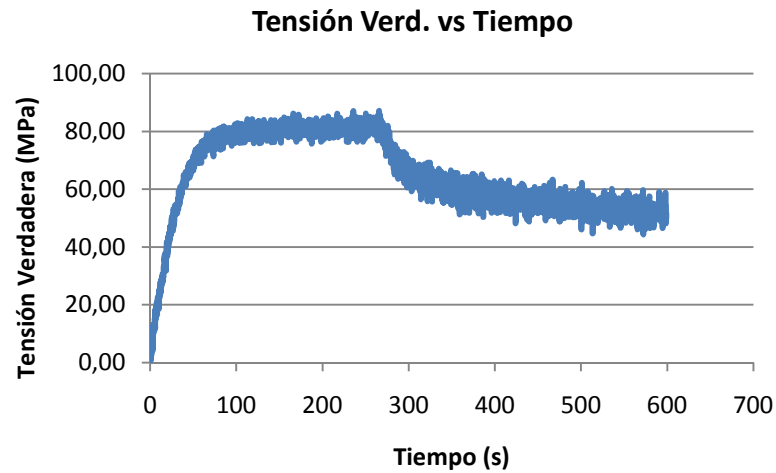


Figura 45: Gráfica σ - t obtenida en un ensayo de relajación

En la gráfica de la Figura 45, se ha interpolado una función exponencial, resultando

$$\sigma = 47,72 e^{-0,002t} \quad (13)$$

Considerando despreciable el tiempo de duración de la rampa hasta que se alcanzó la deformación forzada, el **Módulo de Relajación Y(t)** resulta

$$Y(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_v} = 2807 e^{-0,002t} \quad (14)$$

observándose que para $t = 0$ el valor de $Y(t)$ es cercano al del módulo de elasticidad del material.

La **Función de Fluencia**, $J(t)$, y el Módulo de Relajación, $Y(t)$, se relacionan a través de las *Transformadas de Laplace* de ambos como:

$$\bar{J}(s) * \bar{Y}(s) = \frac{1}{s^2} \quad (15)$$

Aplicando esta expresión se ha obtenido la Función de Fluencia, $J(t)$,

$$J(t) = \frac{1}{2807} (1 - 0,002t) \quad (16)$$

4.5. Comportamiento termo-mecánico de la fibra

Para estimar el incremento térmico asociado a la deformación plástica del material se llevaron a cabo ensayos de tracción durante los cuales se midió el incremento de temperatura en la superficie de la probeta utilizando para ello la cámara de infrarrojos, como se ha detallado en anteriores capítulos. Éstos se realizaron en función de la velocidad de deformación.

a) $\dot{\epsilon} = 0,0004 \text{ s}^{-1}$

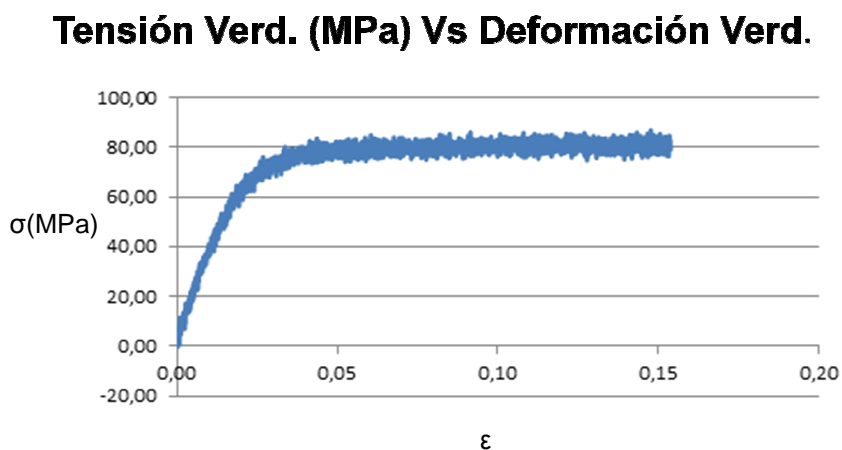


Figura 46: Gráfica Tensión Verdadera vs Deformación Verdadera a $\dot{\epsilon} = 0,0004 \text{ s}^{-1}$

Temperatura Máx. (°C) Vs Deformación Verd.

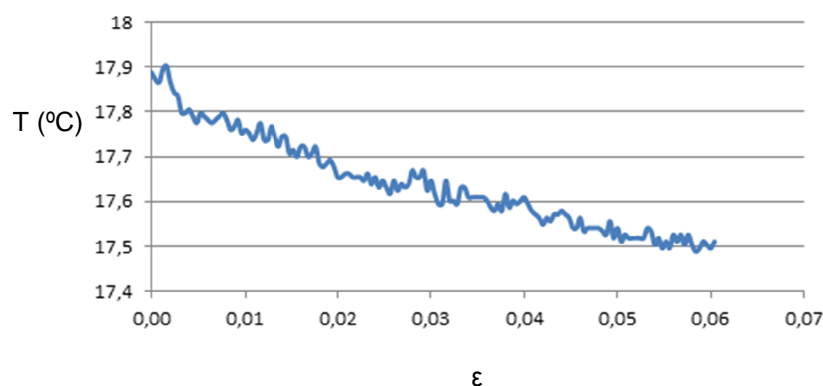


Figura 47: Gráfica Comportamiento Elástico Temperatura vs Deformación Verdadera a $\dot{\epsilon} = 0,0004 \text{ s}^{-1}$

b) $\dot{\epsilon} = 0,0025 \text{ s}^{-1}$

Tensión Verd. (MPa) Vs Deformación Verd.

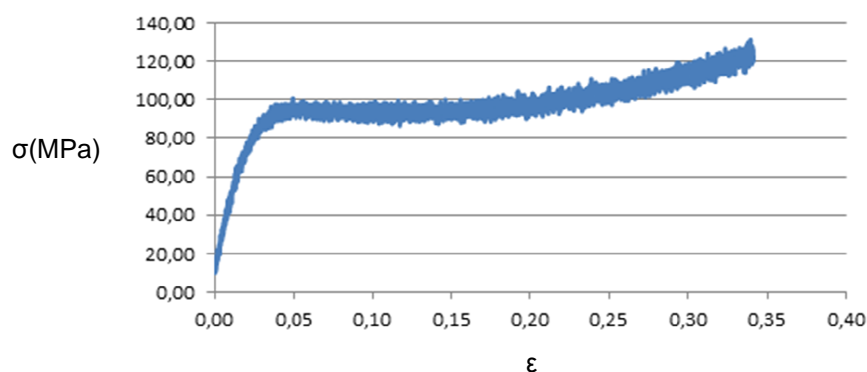


Figura 48: Gráfica Tensión Verdadera vs Deformación Verdadera a $\dot{\epsilon} = 0,0025 \text{ s}^{-1}$

Temperatura Máx. (°C) Vs Deformación Verd.

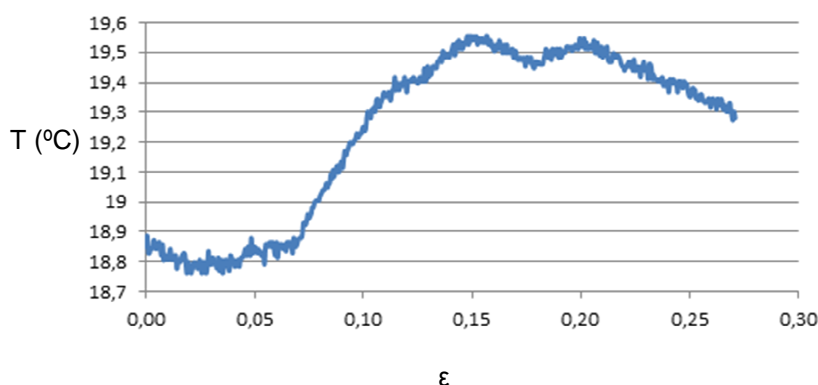


Figura 49: Gráfica Comportamiento Plástico Temperatura vs Deformación

Verdadera a $\dot{\epsilon} = 0,0025 \text{ s}^{-1}$

En los gráficos de las Figuras 46 y 47, para $\dot{\epsilon} = 0,0004 \text{ s}^{-1}$, observamos que el comportamiento térmico existente tras aplicar un ensayo de tracción decrece con la deformación elástica. No ocurre lo mismo para el comportamiento plástico de la deformación representado en las Figuras 48 y 49, $\dot{\epsilon} = 0,0025 \text{ s}^{-1}$, donde se produce un aumento de temperatura de la fibra. La única salvedad en la parte plástica del ensayo la encontramos en la última etapa de deformación previa a la rotura donde se ve como el endurecimiento de la fibra provoca un pequeño descenso de la temperatura.

4.6. Comportamiento fotoelástico de la fibra.

4.6.1. Medición de la tensión óptica durante el proceso de deformación

Para medir la atenuación óptica que la deformación pudiese producir en la fibra plástica, se llevaron a cabo ensayos de tracción de probetas de tipo P₂ con paso simultáneo de un haz de luz por ellas, tomando datos de la Tensión óptica de entrada y de la Tensión óptica de salida. La base de tiempos de las mediciones de la tensión óptica de entrada y de salida se correlacionó con la base de tiempos de la tensión mecánica aplicada por la máquina de ensayo mecánico.

En las Figuras 50, 51 y 52, se muestran, como ejemplo, las gráficas Tensión de salida vs tiempo, Tensión verdadera vs deformación verdadera, b) y deformación vs tiempo, respectivamente, obtenidas en uno de los ensayos de los dos ensayos que se muestran en el estudio.

No se observa una disminución significativa de potencia óptica (la tensión recibida fue prácticamente constante e igual a la tensión de entrada), tal y como era de esperar por los ensayos realizados por otros autores, evidenciándose una atenuación óptica muy pequeña en los rangos de deformación alcanzados.

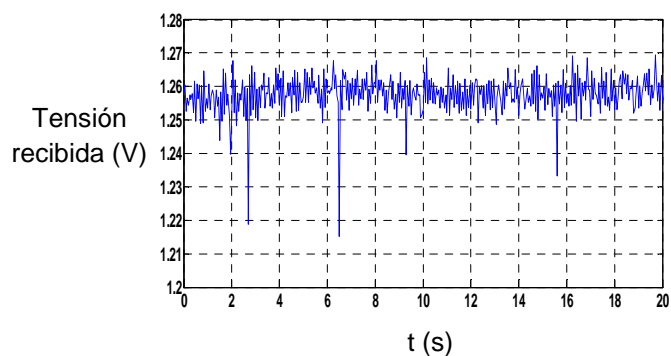


Figura 50: Gráfica Tensión óptica recibida vs tiempo en simultaneidad con ensayo de tracción

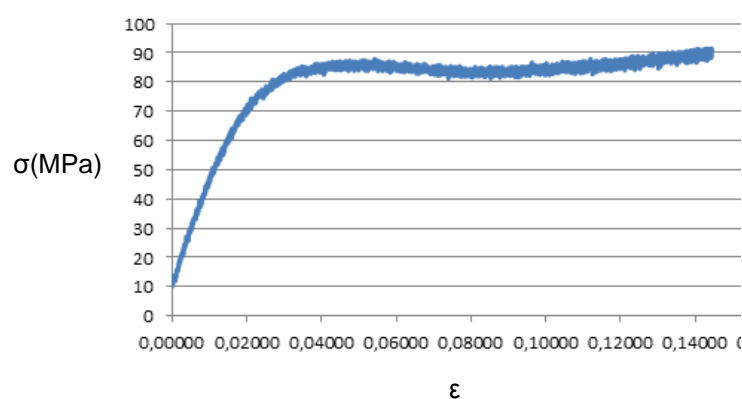


Figura 51: Gráfica Tensión Verdadera vs Deformación Verdadera en simultaneidad con mediciones de atenuación óptica

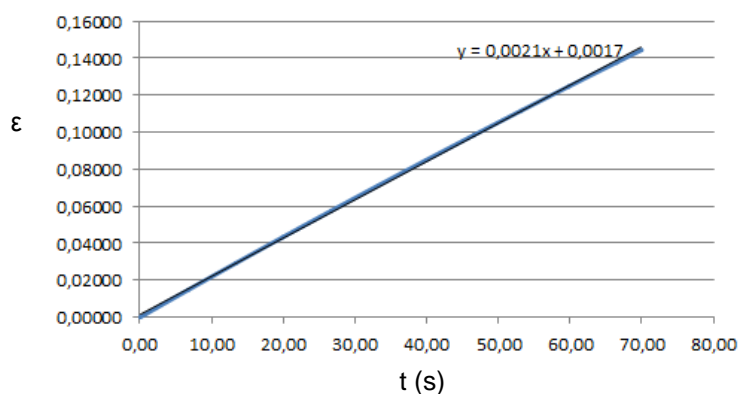


Figura 52: Gráfica Deformación Verdadera vs Tiempo en simultaneidad con mediciones de atenuación óptica

En las Figuras 53, 54 y 55, se muestran las mismas gráficas obtenidas con anterioridad pero para otro ensayo realizado en las mismas condiciones de parámetros iniciales.

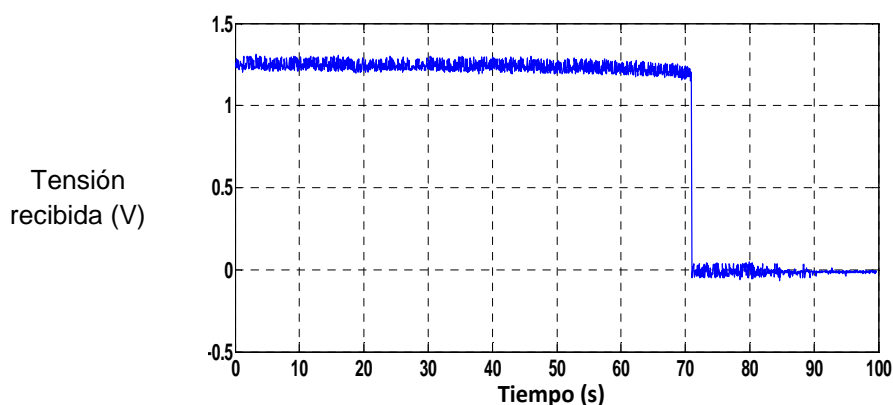


Figura 53: Gráfica Tensión óptica recibida vs tiempo en simultaneidad con ensayo de tracción (2)

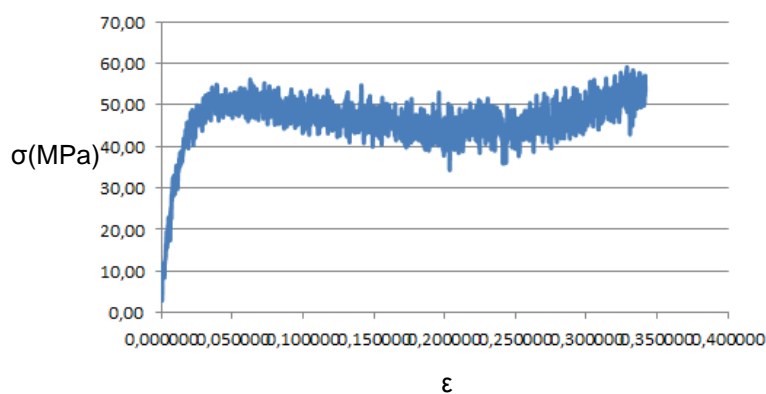


Figura 54: Gráfica Tensión Verdadera vs Deformación Verdadera en simultaneidad con mediciones de atenuación óptica (2)

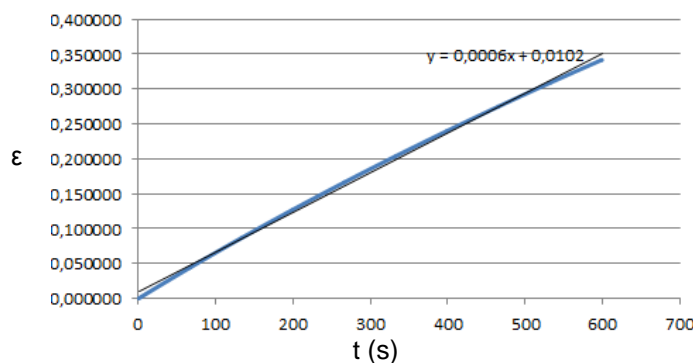


Figura 55: Gráfica Deformación Verdadera vs Tiempo en simultaneidad con mediciones de atenuación óptica (2)

Según las gráficas de este segundo ensayo, se observa como la atenuación óptica de la fibra disminuye mínimamente con la deformación, pudiéndose considerar casi despreciable esta influencia en la transmisión de energía. Como es de suponer, en el momento en el que se produce la rotura, también se produce un corte total de la transmisión ($t=70$ s).

Para mayor detalle de lo que le ocurre a la tensión transmitida, se toma una nueva representación del segundo ensayo. En la Figura 56. se ha realizado un promediado (con factor 9) de las medidas representadas en la Figura 53. En la figura 57. se representa la evolución temporal de la intensidad óptica recibida en % respecto del valor del reposo. Valores del 100% se obtienen para el periodo de tiempo comprendido entre 0 s y 40 s.

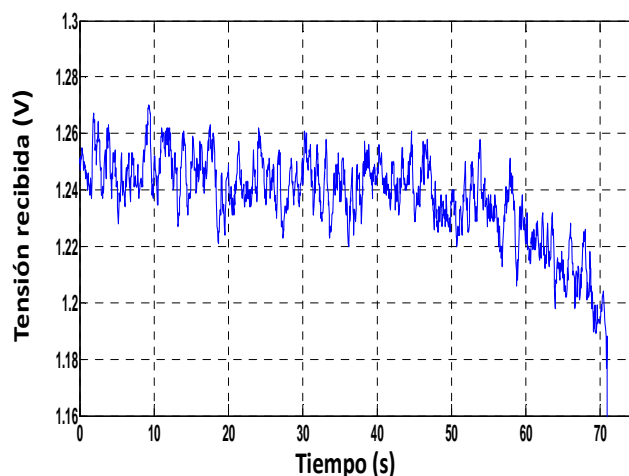


Figura 56: Zoom y promediado de los datos representados en Figura 53.

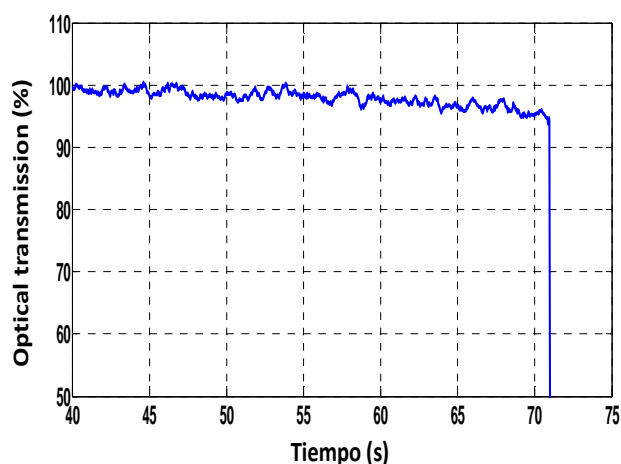


Figura 57: Intensidad óptica recibida en % respecto del valor en reposo.

De la Figura 56. se deduce que la tensión recibida inicia una suave disminución (Atenuación) para valores de la deformación elevados. Aunque las variaciones en la tensión recibida (y por tanto en intensidad óptica) son de escasa magnitud, pueden considerarse apreciables. En la gráfica se observa, también, que a partir de los 71 s no se detecta ninguna señal lo que refleja que en este tiempo se produce, efectivamente como se indicaba antes, la rotura de la fibra.

De todas las gráficas representadas para conocer el comportamiento de la atenuación óptica de una POF sometida a un ensayo de tracción, se observa que, aunque disminuye con la deformación, no existe una influencia muy acusada y, por tanto, se puede considerar prácticamente irrelevante.

Finalmente, correlacionando la evolución temporal de la deformación mostrada en la Figura 58a. con la evolución de la tensión recibida, se obtiene la evolución de la disminución porcentual de Intensidad Óptica con la deformación que se muestra en la Figura 58b.

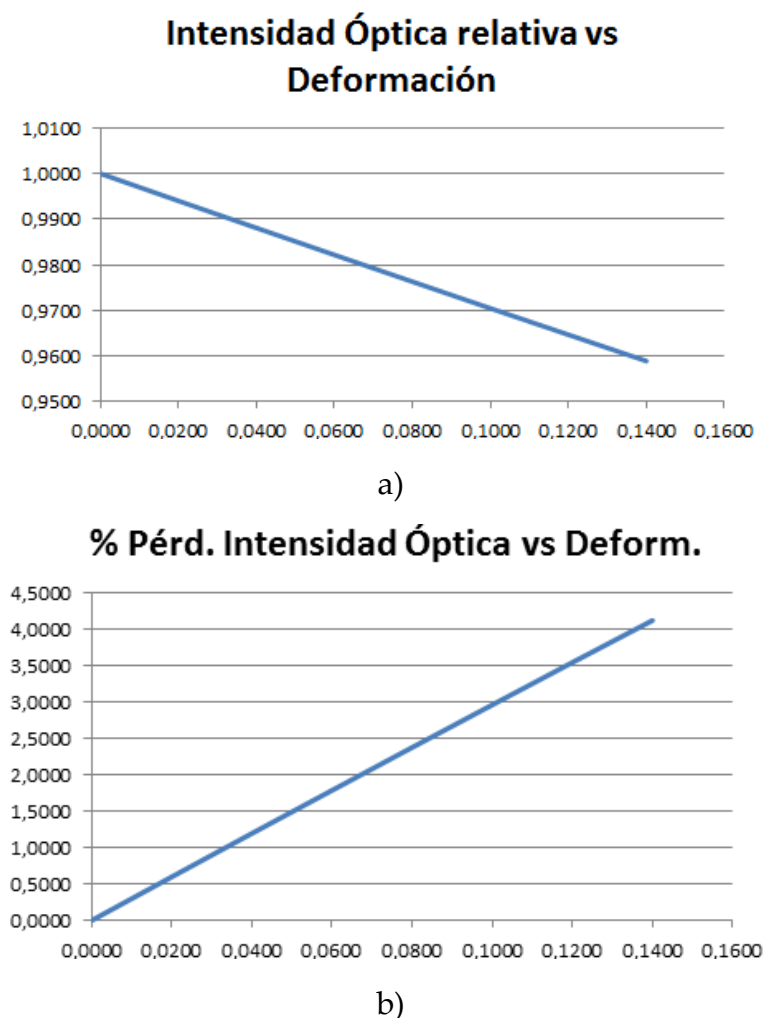


Figura 58: Evolución de la Intensidad Óptica con la deformación.

4.6.2. Medición de la Potencia Óptica con la Velocidad de Deformación.

Como sería de esperar, la velocidad del proceso de deformación también afectará sobre la potencia óptica (Véase Figura 59).

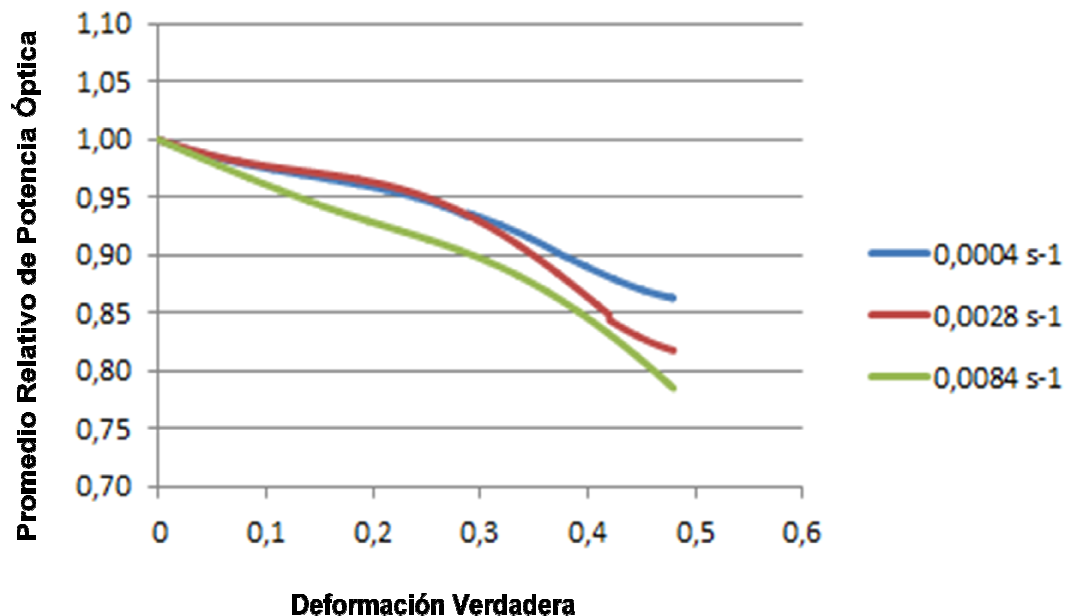


Figura 59: Evolución del Promedio de Potencia óptica relativa con la Deformación y con la Velocidad de deformación.

Se observa como la potencia óptica disminuye con la deformación. Es en el comportamiento plástico donde éste descenso es más acentuado (en el comportamiento elástico, $\varepsilon < 0,03-0,04$, no supera el 2%).

También resulta de importancia la velocidad de deformación, ya que cuanto mayor es esta velocidad mayor decremento se produce en la potencia óptica transmitida.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Se desglosan en diferentes puntos las conclusiones y observaciones que se han llevado a cabo a lo largo del estudio del comportamiento de la fibra óptica plástica.

- El comportamiento elástico del ensayo de tensión-deformación verdadera es el característico en un material sin comportamientos anómalos que señalar. Se observa que la deformación elástica es mayor al tratarse de un material polimérico (menor pendiente del tramo recto elástico).
- En su comportamiento plástico se percibe la mayor parte de las peculiaridades del material. En éste, y como se observaba en estudios previos de otros autores, se produce un desenredamiento molecular del material hacia posiciones estables, es decir, las fuerzas intermoleculares no pueden equilibrar a la tensión aplicada. Esto origina que en una

primera etapa de este comportamiento, se mantenga constante la tensión con el aumento de la deformación; es en la segunda donde se visualiza una representación cóncava de la curva, es decir, existe un descenso de la tensión con el aumento de la deformación provocado por el desenredamiento molecular anteriormente indicado (la fibra se va estirando), hasta que las cadenas moleculares llegan así a su límite de elongabilidad. Es a partir de éste punto donde se produce el endurecimiento final del material.

- El máximo valor del Módulo de Yonug coincide con la pendiente del tramo recto de deformación elástica. Es a partir de aquí, ya en la parte plástica, donde se produce una disminución de este parámetro hasta que, en la máxima elongabilidad de las cadenas moleculares, se produce un suave crecimiento que coincide con el endurecimiento del material.
- El límite elástico o de fluencia en una deformación de material polimérico, no resulta tan claro. Según dos procesos de deducción experimental, $\sigma_{y1} = 77MPa$ y $\sigma_{y2} = 79.3MPa$. Este valor resulta ser 10 veces menos que el característico por un material metálico (Acero Inoxidable, $\sigma_y = 700MPa$). Esto demuestra el carácter dúctil del material que compone una POF.
- La resistencia de tracción o tensión de rotura, se trata de un valor cercano al límite elástico del material. Debida a la representación de la curva, en la que la parte plástica sufre una concavidad manifiesta como se ha

podido observar, el valor de tensión de rotura alcanza valores del orden del límite de fluencia.

- En el estudio del comportamiento de la fibra óptica con cubierta protectora, se observa que resulta irrelevante su participación en la oposición a la deformación. Eso lleva a considerar que todo el proceso de tracción recae sobre el núcleo y revestimiento de la fibra.
- La velocidad del proceso es una de las magnitudes importantes y a tener muy en cuenta por su influencia en el mismo. Como sería de esperar, el aumento de la velocidad de deformación provoca un aumento en sus valores de Módulo de Young, límite de fluencia y tensión de rotura, debido a la mayor oposición y endurecimiento de las cadenas moleculares del material. En cambio la deformación de rotura se ve disminuida por un incremento tan violento de la deformación de la fibra, que en vez de provocar un desenredamiento de las cadenas moleculares de manera ordenada, provoca una rotura más precipitada e inesperada.
- En el comportamiento viscido de la fibra óptica resulta tener un papel importante el tiempo del proceso. Tanto en una función de fluencia, $J(t)$, como en el módulo de relajación, $Y(t)$, resulta de importancia este parámetro. En un ensayo a deformación constante, efectivamente, la tensión sufre una disminución asintótica.

- La importancia térmica en un ensayo de tracción se puede considerar despreciable. Mientras que durante el comportamiento elástico se produce inclusive una disminución de la temperatura, es durante el comportamiento plástico del proceso donde ésta sufre un incremento. Como cabía de esperar, también en la parte final del ensayo, débase al endurecimiento del material, se produce previa rotura un suave decremento de temperatura. Por tanto, la diferencia de temperatura entre una fibra en reposo y otra a la que se le aplica una deformación resulta ser irrelevante: $\Delta T < 1^{\circ}\text{C}$.
- En relación a la atenuación óptica de transmisión de la fibra, la tensión recibida inicia una suave disminución para valores de deformación elevados. Las variaciones en la tensión recibida (y por tanto en intensidad óptica) son de escasa magnitud, por lo que pueden considerarse inapreciables. Es en el momento de la rotura del material cuando, efectivamente, se produce un salto de tensión debido a que la transmisión queda cortada ($V=0$).
- El índice de refracción de una fibra óptica sobre la cual pasa un haz de luz y sufre a su vez un proceso de deformación, se ve disminuido levemente en valores de pequeñas deformaciones, pudiéndose considerar prácticamente constante en una estabilización del proceso.
- Como le ocurre al índice de refracción, la potencia óptica transmitida queda influenciada negativamente por la deformación, de manera más acentuada en el comportamiento plástico de ésta. La velocidad de deformación también resulta un factor importante, ya que a mayor velocidad, mayor disminución de la potencia transmitida.



CAPÍTULO 6

TRABAJO FUTURO

Algunos de los trabajos futuros y con relación al estudio que se ha presentado en este proyecto, pueden ser:

- Estudiar el efecto de la temperatura del ensayo sobre el comportamiento termo-mecánico y óptico de la POF.
- Estudiar la aplicabilidad de otros tipos de fibra (Ej: Fibra de Vidrio) en sistemas de monitorización de la deformación en estructuras.
- Someter a la POF a otro tipo de ensayos, como, por ejemplo, el ensayo de torsión.

CAPÍTULO 7

BIBLIOGRAFÍA

- Aravas N., Kim K. S. y Leckie F. A. "On the calculations of the stored energy of cold work". J. Eng. Mater. Technol., 1990, 112, 4, P.P. 465-470.
- Arrue J., Zubía J., Fuster G., and Kalymnios D., "Light power behaviour when bending plastic optical fibers", IEE. Proc. Optoelectronics, Vol. 145, No. 6, pp. 313-318, 1998.
- Bertholds A. and Dandliker R. (1987). "Deformation of single-mode optical fibers under static longitudinal stress" Lightwave Technology, Journal of 5(7): 895-900.
- Buck J. A. (2004). Fundamentals of Optical Fibers. London, Wiley & Sons, Inc.
- Buckley C. P., Harding, J., Hou, J. P., Ruiz, C. y Trojanowski, A. "Deformation of thermosetting resins at impact rates of strain. Part I: Experimental study". Journal Mech. Phys. Solids, 2001, 49, P.P. 1517-1538.
- Burnay, S. G., Williams, T. L. y Jones, C. H. "Applications of thermal imaging" 1 ed. (Eds), Bristol: Adam Hilger, 1988, 248.
- Butter, C. D. and G. B. Hocker (1978). "Fiber Optics Strain Gauge" Appl. Opt. 17(18): 2867-2869.

- Changhong J. M., Kuzyk G., Jow-Lian Ding, Johns W.E., and Welker D.J. (2002). "Fabrication and mechanical behavior of dye-doped polymer optical fiber" *Journal of Applied Physics* 92(1): 4-12.
- Chen Y.C., Chen L. W., Chen P.C. (2005). "Combined effects of bending and elongation on polymer optical fiber losses". *Opt. Lett.* 30(3): 230-232.
- Chen Y.C., Chen P. C., Kuang J.H. (2006). "Effect of elongation deformation on power losses in polymer optical fibers" *Appl. Opt.* 45(26): 6668-6674.
- Chen Y.C. (2007). "Power losses in bent and elongated polymer optical fibers" *Appl. Opt.* 46(21): 4570-4578.
- Chen L.W., Tsai H. H., Ke Y.L., Chen Y.C. (2008). "Power losses in deformed graded-index polymer optical fibers" *Appl. Opt.* 47(27): 4907-4914.
- Dettenmaier, M. *Chimia*, 1993, 47, 397.
- Duijnhoven, F.G.H., *Gradient refractive index polymers produced in a centrifugal field: preparation, characterization and properties*, Technical University, Eindhoven, The Netherlands, ISBN 90-386-2581-2, 1999.
- Durana G. et al, "Assessment of an LPG mPOF for Strain Sensing". *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 12, NO. 8, AUGUST 2012
- Ehrenstein, G. W. (2000). *Polymeric Materials: Structure- Properties- Applications*. Cincinnati, OH., Hanser Gardner Publications, Inc.
- Emslie, C., *J. Materials Sci.*, 23, 1988, pp. 2281-2293.
- Gaussorgues, G. "La thermographie infrarouge: Principes technologies applications", Paris: En: *Techniques et documentation* Lavoisier, 1989,

- Hartley, k., Duffy, J. y Hawley, R. H. "Measurement of the temperature profile during shear band formation in steels deforming at high strain rates". J. Mech. Phys. Sol., 1987, 35, 3, P.P. 283-301.
- Haslach H.W. Jr, Sirkis J. S. (1991). "Surface-mounted optical fiber strain sensor design" Appl. Opt. 30(28): 4069-4080.
- Hodowany, J., Ravichandran, G., Rosakis, A. J. y Rosakis, P. "Partition of plastic work into heat and stored energy in metals". Exp. Mech., 2000, 40, P.P. 113-123.
- Hudson, R. D. "Infrared system engineering", New York: John Wiley & Sons, 1969, 642.
- Joachim, A. K. "Quantitative measurement of the heat exchange during deformation using an infrared camera". Thermochemica acta, 1994, 247,1, P.P. 55-64.
- Kaplan, H. "Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment", 2 ed. (Eds), Washinton: SPIE Optical enginnering press, 1999, 163.
- Kiesel, S., P. Van Vickle, et al. (2006). "Intrinsic polymer optical fiber sensors for high-strain applications" 616713-616713.
- Kiesel, S. (2007). Intrinsic, single-mode polymer optical fiber sensors for large strain applications, North Carolina State University. MSc.
- Kiesel, S., K. Peters, et al. (2007). "Polymer optical fiber sensors for civil infrastructure systems" 65293B-65293B.
- Kiesel, S., K. Peters, et al. (2007). "Behavior of intrinsic polymer optical fiber sensor for large-strain applications" 65300E-65300E.
- Kapoor, R. y Nemat-Nasser, "Determination of temperature rise during high strain rate deformation". Mech. of Materials, 1998, 27, P.P. 1-12.



- Kuang K. S. C, Cantwell W. J. and Scully P. J. (2002). "An evaluation of a novel plastic optical fiber sensor for axial strain and bend measurements" Meas. Sci. Technol. 13(10): 1523-1534.
- Lerch, V., Gary, G. y Hervé, P. "Thermomechanical properties of polycarbonate under dynamic loading". J. Phys. IV (DYMAT), 2003,110, P.P. 159-166.
- Lieher S. et al "Polymer Optical Fiber Sensors for Distributed Strain Measurement and Application in Structural Health Monitoring". IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 9, NO. 11, NOVEMBER 2009
- Macdogall, D. y Harding, J. "The measurement of specimen surface temperature in high-speed tension and torsion tests". Int. J. Impact Eng, 1998, 21, 6, P.P. 473-488.
- Macdogall, D. "Determination of the plastic work converted to heat using radiometry". Exp. Mech., 2000, 40, 3, P.P. 298-306.
- Mahan, R. J. "Description of real surface; surface properties". Radiation heat transfer: A statistical approach. (Eds), New York: John Wiley & Sons, 2002, 69-93.
- Manson, J. J., Rosakis, A. J. y Ravichandran, G. "On the strain and strain rate dependence of the fraction of plastic work converted to heat: an experimental study using high speed infrared detectors and Kolsky bar". Mech. of Materials, 1994, 17, 2-3, P.P. 135-145.
- Mitchell, M. (2002). Design and microfabrication of a molded polycarbonate continuous flow polymerase chain reaction device. Department of Mechanical Engineering, Louisiana State University. Thesis.
- Murhanghan, F. D. (1951). Finite Deformation of an Elastic Solid. London, Wiley & Sons, Inc.

- Nakamura, K., I. R. Husdi, et al. (2005). "A distributed strain sensor with the memory effect based on the POF OTDR" 807-810.
- Noble, J. P. y Harding, J. "Temperature measurement in the tensile Hopkinson bar test". Meas. Sci. Technol., 1994, 5, 9, P.P. 1163-71.
- Peng G. D. and Chu P. L. (2002). "Polymer Optical Fiber Sensing" Proceedings of SPIE 4929: 303-311.
- Rittel, D. "Transient temperature measurement using embedded thermocouples". Exp. Mech., 1998, 38, 2, P.P. 73-79.
- Rabin, Y. y Rittel, D. "A model for the time response of solid-embedded thermocouples". Exp. Mech., 1999, 39, 2, P.P. 133-137.
- Rittel, D. "On the conversion of work to heat during high strain rate deformation of glassy polymers". Exp. Mech., 1999, 31, P.P. 131-139.
- Rittel, D. y Rabin, Y. "An investigation of the heat generated during cyclic loading of two glassy polymers. Part 2: Thermal analysis". Mech. of Materials, 2000, 32, P.P. 149-159.
- Rusinek, A., Novacki, W. K., Gadaj, P. y Klepaczko, J. R. "Measurement of temperature coupling by thermovision and constitutive relation at high strain rates for the dual phase sheet steel". J. Phys. IV (DYMAT), 2003, 110, P.P. 411-416.
- Siegel, R. y Howell, J. R. "Radiation from a blackbody". Thermal radiation heat transfer. 3 ed. (Eds), New York: Taylor & Francis, 2002, 1-44.
- Silva-López, M., A. Fender, et al. (2005). "Strain and temperature sensitivity of a single-mode polymer optical fiber" Opt. Lett. 30(23): 3129-3131.
- Sonnenfeld, C., Sulejmani, S., Geernaert, T., Eve, S., Lammens, N., Luyckx, G., Voet, E., Degrieck, J., Urbanczyk, W., Mergo, P., Becker, M.,

Bartelt, H., Berghmans, F., Thienpont, H., "Microstructured Optical Fiber Sensors Embedded in a Laminate Composite for Smart Material Applications", Sensors 11(3), 2566-2579 (2011).10.3390/s110302566

van Steenkiste R. J. and. Springer G. S. (1997). Strain and Temperature Measurement with Fiber Optic Sensors. Lancaster, PA, Technomic Publishing.

- Tapetado, Vázquez C., Zubia J. "Temperature sensor based on Polymer Optical Fiber macro-bends" 20 th Internacional Conference on Plastic Optical Fibers ICPOF 2011207-212, 2011.
- Taylor, G. I. y Quiney, H. "Latent energy remaining in a metal after cold working". Proceedings of the Royal Society, 1933, A, 143, P.P. 307-326.
- Trojanowski A., Macgregor C. y Harding J. "An improved technique for the experimental measurement of specimen surface temperature during Hopkinson-bar tests". Meas. Sci. Technol., 1998, 9, P.P. 12-19.
- Vedam, K. a. R. S. (1967). "Non-linear piezo-optics". Acta Crystallographica 22: 630-634.
- Walley S. M., Proud W. G., Rae P. J. y Field E. "Comparison of two methods of measuring the rapid temperature rises in split Hopkinson bar specimens". Review of scientific instruments, 2000, 71, 4, P.P. 1766-1771.
- Webb, D.J., "Polymer photonic crystal fiber for sensor applications", Proc. SPIE 7726, 77260Q (2010).10.1117/12.859090
- Xiong, Z., G. D. Peng, et al. (1999). "Highly tunable Bragg gratings in single-mode polymer optical fibers" Photonics Technology Letters, IEEE 11(3): 352-354.
- Yang, D. X., J. Yu, et al. (2004). "Structural and mechanical properties of polymeric optical fiber" Materials Science and Engineering: A 364(1-2): 256-259.



- Zehnder, A. T. "A Model for the heating due to plastic work". Mechanics Research Communications, 1991, 18, 1, P.P. 23-28.
- Zehnder, A. T., Babinsky, E. y Palmer, T. "Hybrid method for determining the fraction of plastic work converted to heat". Exp. Mech., 1998, 38, 4, P.P. 295-302.
- Ziemann O., Peter J.K., Zamzow E., and Daum W. (2008). POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems Berlin, Springer Berlin Heidelberg.
- Gotzon Aldabaldetrekú, Zubía J. (2006), Geometric Optics Theory of Multi-Step Index Optical Fibres.
- Guzman López, Rolando Enrique, Pérez Castellanos, Jose Luis (2009) "Obtención de leyes tensión-deformación de materiales viscoplásticos a partir de mediciones del incremento de temperatura asociado a su deformación plástica"

ANEXO 1.

CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA INFRARROJA

Previamente antes de cualquier toma de datos o medición, es necesario realizar una calibración de los equipos de medida, y en este caso no iba a ser de excepción.

Los valores que se han tenido en consideración, para la comprobación de correcta medición de la cámara, han sido valores de Temperatura obtenidos en los dispositivos termopares y valores de *Radiancia* (W/sr cm^2). La calibración nos va a determinar si los equipos de medida se encuentran en estado correcto para ser usados.

La calibración de la Cámara IR ha consistido en la realización de diferentes ensayos variando los parámetros que a continuación se citan:

- Configuración de toma de imagen (Tamaño de pantalla, Tiempos de adquisición, frecuencia de imagen).
- Mediciones en aumento y en disminución de temperatura (en un rango de temperatura predeterminada), mediante la utilización de los dispositivos de temperatura (Hornillo, Controlador de Temperatura y sensores de medida o Termopares).
- Variación de los ROI (zonas de interés térmico de la imagen tomada), tanto geométrica como posicionalmente.

- Consideración de diferentes valores de *Emisividad* ϵ del proceso.

El proceso de pruebas de calibración queda detallado por cada módulo de ejecución del software de recepción de datos de la Cámara IR: *RTools HSDR FLIR SISTEMAS 2.3 SR-1*.

• Módulo SC600

Metodología teórica de análisis: En este primer módulo (Ver Figura 60.) se seleccionan los parámetros de medición de imagen de la Cámara IR. En él se permite la previa conexión y reconocimiento del PC con la Cámara, y se incluyen principalmente parámetros como: *integration time* (tiempo de integración de imagen), *window size* (tamaño de pantalla de resolución de la imagen), *frame Rate* (frecuencia de imagen).

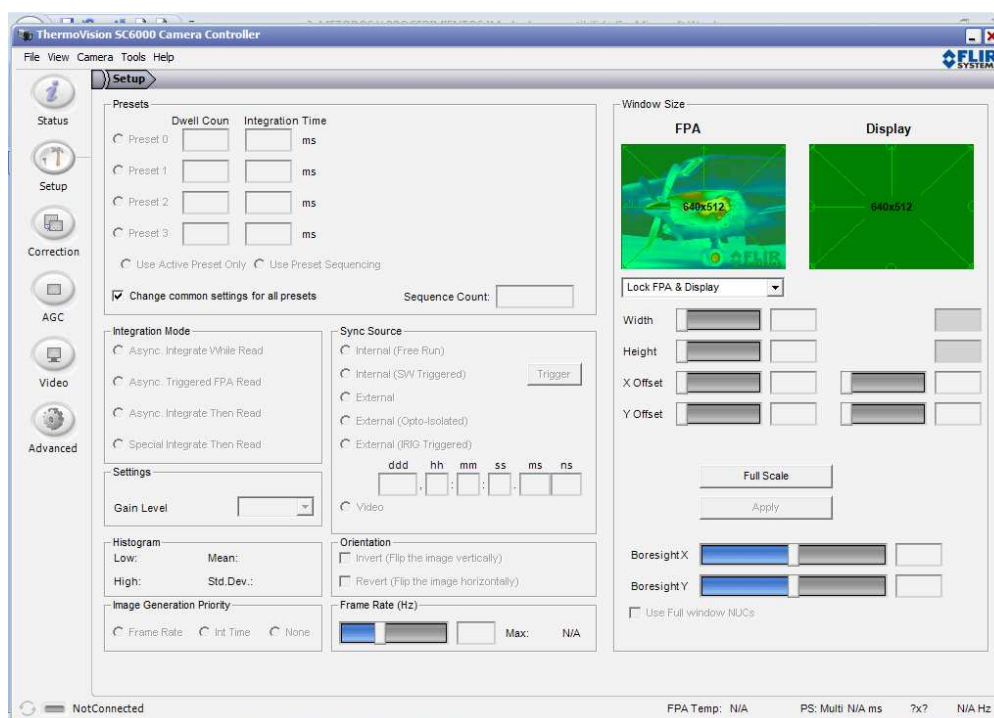


Figura 60: SC600 – “Set up” Cámara IR. Configuración de conexión.

Metodología experimental de análisis: Las diferentes pruebas de calibración realizadas han coincidido en los parámetros referidos a este módulo (Ver Figura 61.).

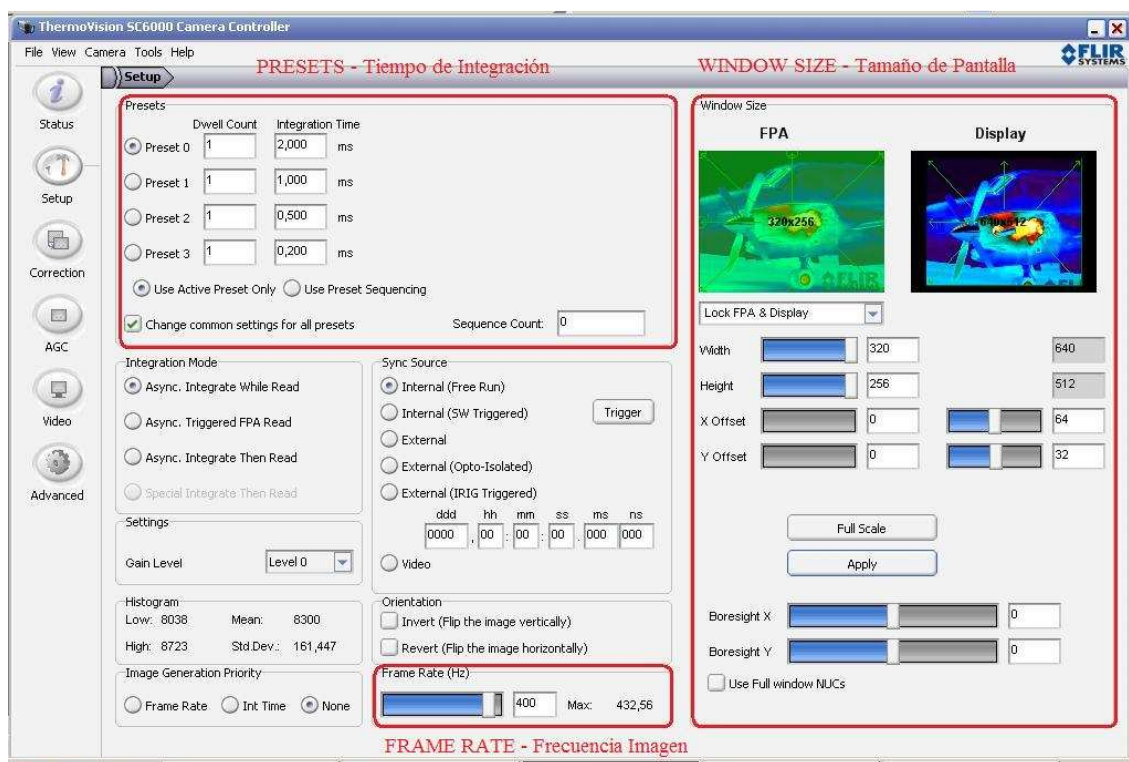


Figura 61: SC600 – Módulo de caracterización de parámetros iniciales de imagen.

Dentro de la ventana de *Presets*, se selecciona, para todas las pruebas, el *Preset 0*, que corresponde a un Tiempo de Integración $T_i=2\text{ ms}$ (Ver Figura 62.).

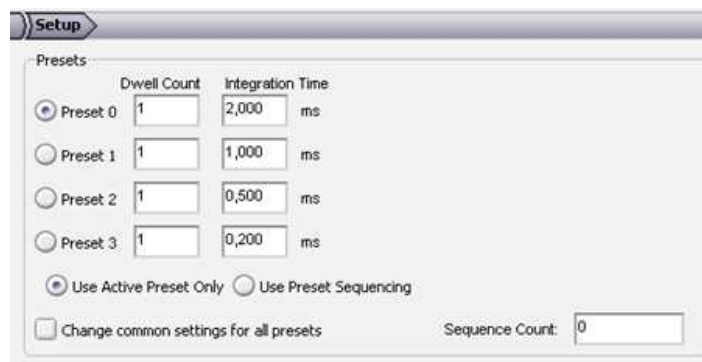


Figura 62: SC600 – Presets (Preset 0 – $T_i=2\text{ms}$)

En la *Window Size*, se selecciona la configuración de pantalla de imagen máxima permitida por el tipo de Cámara IR utilizada en este proyecto, 320x256 (Ver Figura 63.).

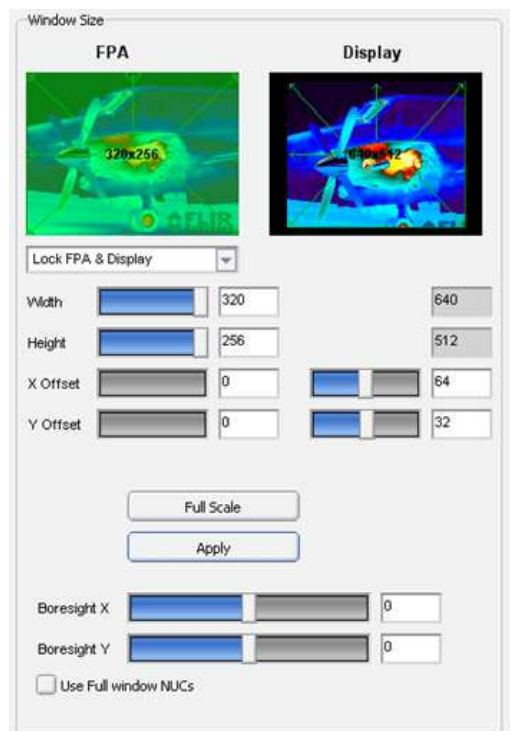


Figura 63: SC600 – Window Size (320 x 256)

El último de los parámetros a ajustar en este módulo inicial es el *Frame Rate* o Frecuencia de toma imagen. Esta frecuencia queda intrínsecamente ligada a los parámetros citados con anterioridad de dimensión de ventana y de tiempo de integración. Se selecciona una frecuencia $f=400\text{ Hz}$ (Ver Figura 64).



Figura 64: SC600 – Frame Rate ($f=400\text{Hz}$)

- **Módulo RDac**

1. Metodología teórica de análisis: el RDac es el segundo módulo del software utilizado. En este módulo se puede visualizar la imagen tomada por la cámara en tiempo real. Permite grabar una serie de toma de imágenes, de modo que se pueda observar el incremento térmico si hubiera existido.

En lo que a Calibración se refiere, en este módulo nos interesa la generación de ROI'S o zonas de interés térmico. Con este comando, podemos seleccionar en la pantalla la zona de imagen captada por la cámara que nos interesa analizar y que posteriormente utilizaremos en el módulo de calibración específico (RCAL) para la recopilación de los datos requeridos.

2. Metodología experimental de análisis: se han considerado unas similares propiedades de adquisición (*RDac Properties* → *Adquisition Options*) en todas las pruebas de calibración llevadas a cabo (Ver Figura 65.); no así en lo que se refiere a la generación de los diferentes ROI, seleccionándose en cada caso uno de diferente ubicación y carácter geométrico (Ver Figuras 66. y 67.).

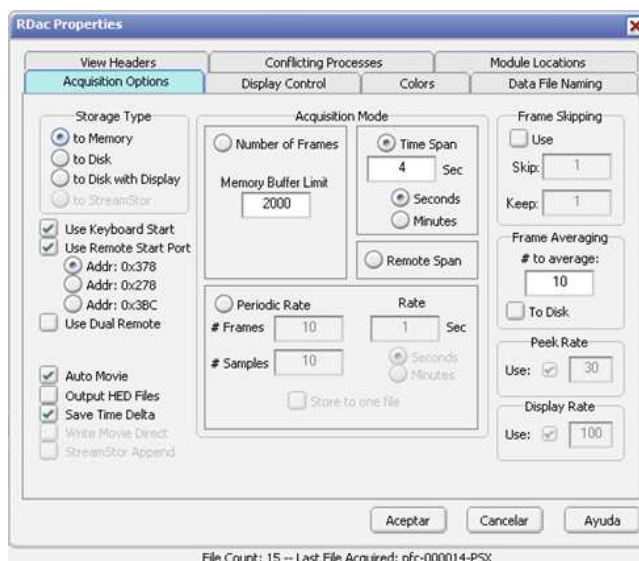


Figura 65: *RDac Properties* – *Adquisition Options*

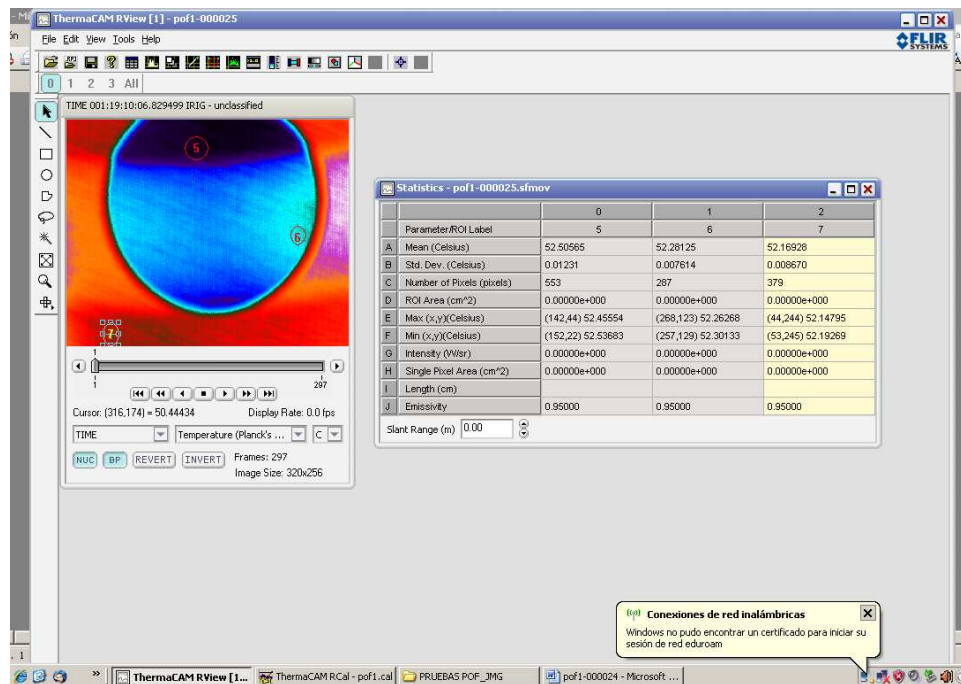


Figura 66: ROI'S de Medida

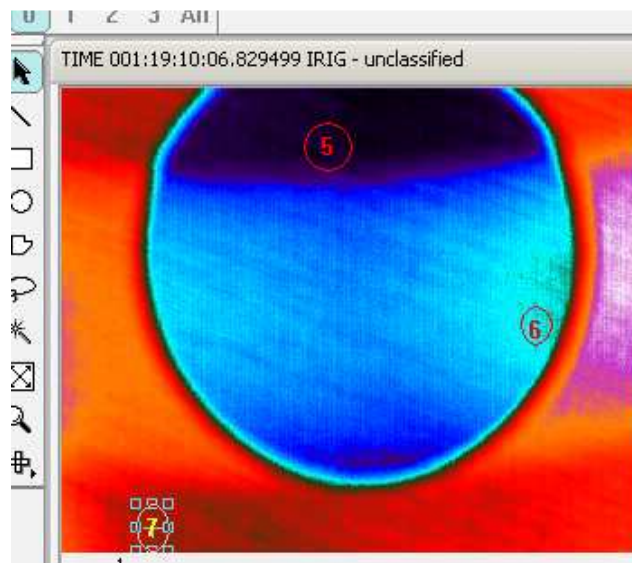


Figura 67: ROI'S de Medida

Es importante señalar, que para enlazar el módulo RDac con el que a continuación utilizaremos y que nos servirá para representar los datos de calibración, RCal, se debe cargar en el primero de los módulos nombrados un archivo, (*cal_0.1-0.2ms_25-125C.inc*), ya obtenido para un trabajo anterior al que se presenta (*“Obtención de leyes de Tensión-Deformación de materiales Viscopelásticos a partir de mediciones del incremento de Temperatura asociado a su Deformación Plástica”*, realizado por Prof. Rolando Enrique Guzmán López). Ver Figura 68.

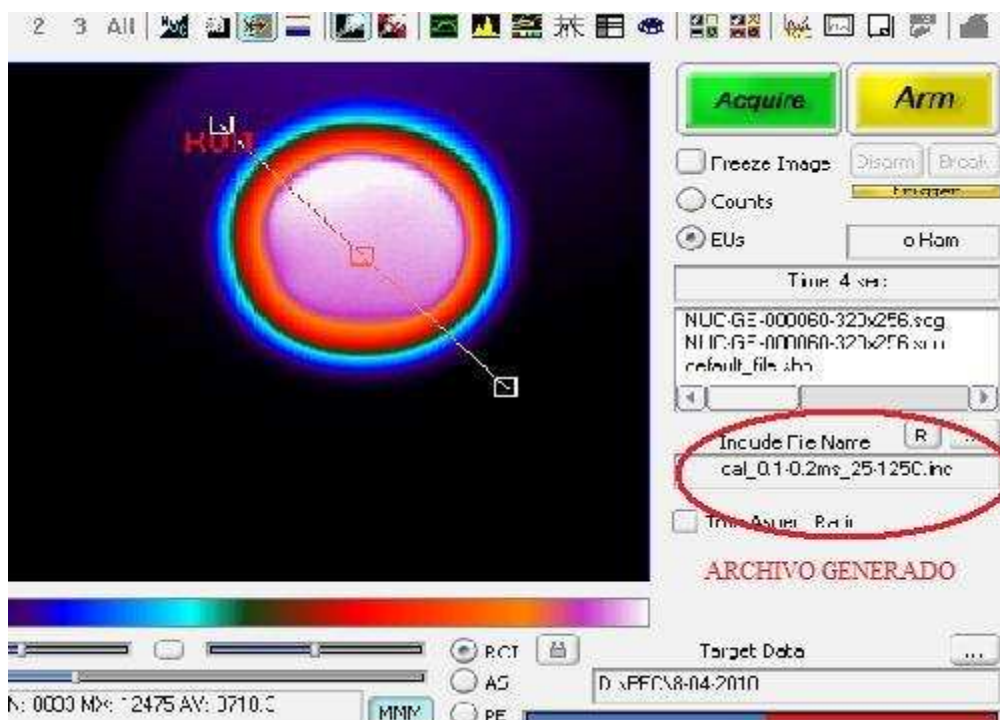


Figura 68: RDac Archivo generado enlace RCal (*cal_0.1-0.2ms_25-125C.inc*)

- **Módulo RCal.**

1. Metodología teórica de análisis: el módulo donde los datos de calibración de la cámara se hacen visibles es el RCal. La validez del incremento de temperatura existente en el material que se quiere medir depende de manera *casi* exclusiva de que dichos datos sean correctos.

2. Metodología práctica de análisis: se han llevado a cabo diferentes calentamientos y enfriamientos de la zona de medición, de manera que en la toma de temperatura y radiancia (para diferentes emisividades) se obtengan valores de *mesaurement* del mismo orden.

El *Measurement* se puede definir como el número de medidas o cuentas que lleva a cabo la cámara en la captación de imágenes. Este valor aumentará con la temperatura y viceversa con la disminución de esta.

A continuación, se muestran las diferentes experiencias realizadas para el ajuste calibrado de la cámara, para enfriamientos, calentamientos y consideración de diferente emisividad en el interior de la cámara de ensayos o caja metálica.

1) Prueba A de Calibración.

Tomando como ROI'S de medida tres líneas continuas, definidas como 0, 1 y 2, se puede observar como los datos de medida que nos proporciona la cámara termográfica son correlativos con los valores de emisividad considerados para cada uno de los ROI'S (Ver Figuras 69., 70. y 71.).

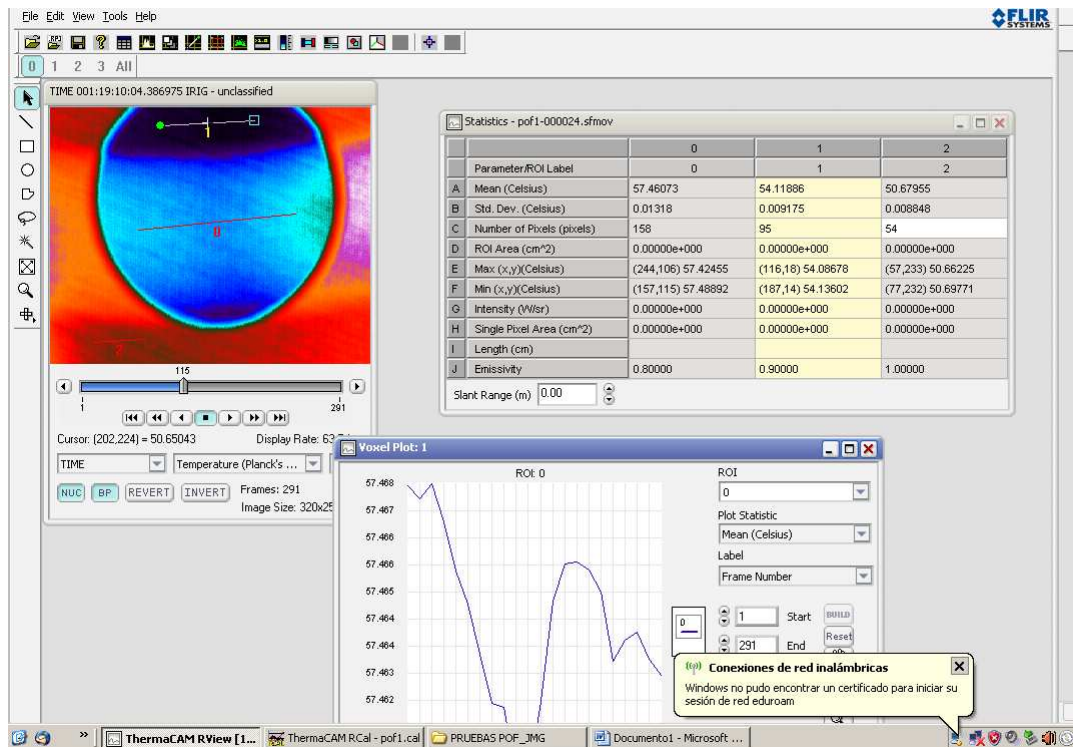


Figura 69: Prueba A

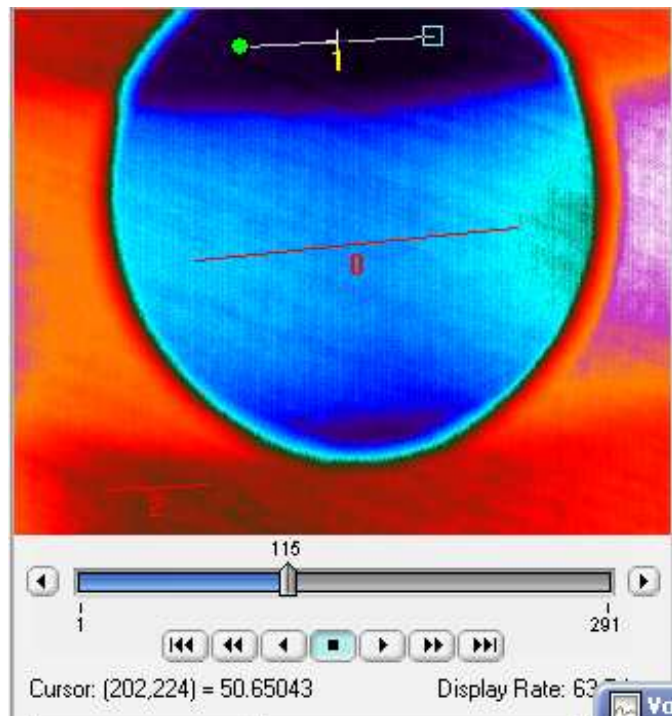


Figura 70: Prueba A; ROI'S de medida.

Statistics - pof1-000024.sfmov				
		0	1	2
	Parameter/ROI Label	0	1	2
A	Mean (Celsius)	57.46073	54.11886	50.67955
B	Std. Dev. (Celsius)	0.01318	0.009175	0.008848
C	Number of Pixels (pixels)	158	95	54
D	ROI Area (cm ²)	0.00000e+000	0.00000e+000	0.00000e+000
E	Max (x,y)(Celsius)	(244,106) 57.42455	(116,18) 54.08678	(57,233) 50.66225
F	Min (x,y)(Celsius)	(157,115) 57.48892	(187,14) 54.13602	(77,232) 50.69771
G	Intensity (W/sr)	0.00000e+000	0.00000e+000	0.00000e+000
H	Single Pixel Area (cm ²)	0.00000e+000	0.00000e+000	0.00000e+000
I	Length (cm)			
J	Emissivity	0.80000	0.90000	1.00000
Slant Range (m)		0.00		

Figura 71: Prueba A; Tabla de datos diferentes ROI'S

- ROI 0: emisividad de 0,8, representado en el área de la fibra óptica plástica POF de muestra, y a la cual se le está induciendo una transmisión de energía en forma de luz y un calentamiento exterior mediante el hornillo de laboratorio.
- ROI 1: emisividad de 0,9, se encuentra representado en la zona de alrededor de la fibra, midiéndose la temperatura de la zona que rodea a ésta.
- ROI 2: emisividad de 1, en zona comprendida de la cámara oscura, tomado como medida comparativa con los otros dos ROIS.

Los datos de emisividad y de temperatura de cada uno de los ROI'S reflejan perfectamente el cumplimiento de la Ley de Stefan-Boltzmann,

$$\dot{Q}_{emitida} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4 \quad (17)$$

donde queda relacionado el flujo de calor de emisión Q , la emisividad ϵ , la constante de Stefan-Boltzman $\sigma = 5.67 \text{ E-8 W / (m}^2\text{K}^4\text{)}$, el área superficial del objeto A_s , y la temperatura superficial del objeto T_s .

Para un flujo de calor constante, la emisividad y la temperatura resultan ser inversamente proporcionales según la ecuación que fundamenta citada ley de Stefan-Boltzmann, por lo que al aumentar un valor, el otro debe disminuir, como ocurre en los datos obtenidos en el software de captura (Tabla 9.).

Nº ROI	T (º C)	ϵ
5	57,4	0,8
6	54,12	0,9
7	50,7	1

Tabla 9: Valores de temperatura ROI'S Prueba A

2) Prueba B de Calibración.

En esta segunda prueba se consideran ROI'S puntuales. Por ello se toman tres puntos, denominados en este caso por punto 5, ubicado en el fondo de la caja oscura y correspondiente a la zona donde se encuentra la placa generadora de calor (fondo de la caja oscura); punto 6, situado en la fibra POF de prueba, sobre la cual existe una transferencia de energía y siendo sometida a su vez al calor generado por la placa; y por último el punto 7, ubicado en la parte exterior de la cámara oscura (Ver Figura 72.).

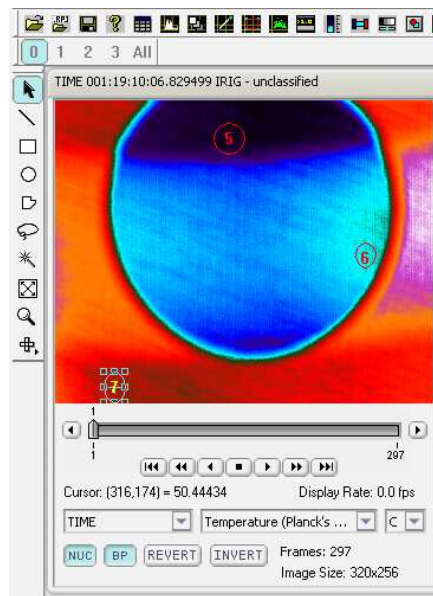


Figura 72: Prueba B

Todos los ROI'S considerados en la prueba, se toman con una emisividad de 0,95. De alguna manera, esto sirve para poder comprobar la diferencia de temperaturas entre puntos y si esta es razonable en un entorno de emisividad constante. (Ver Figura 73.).

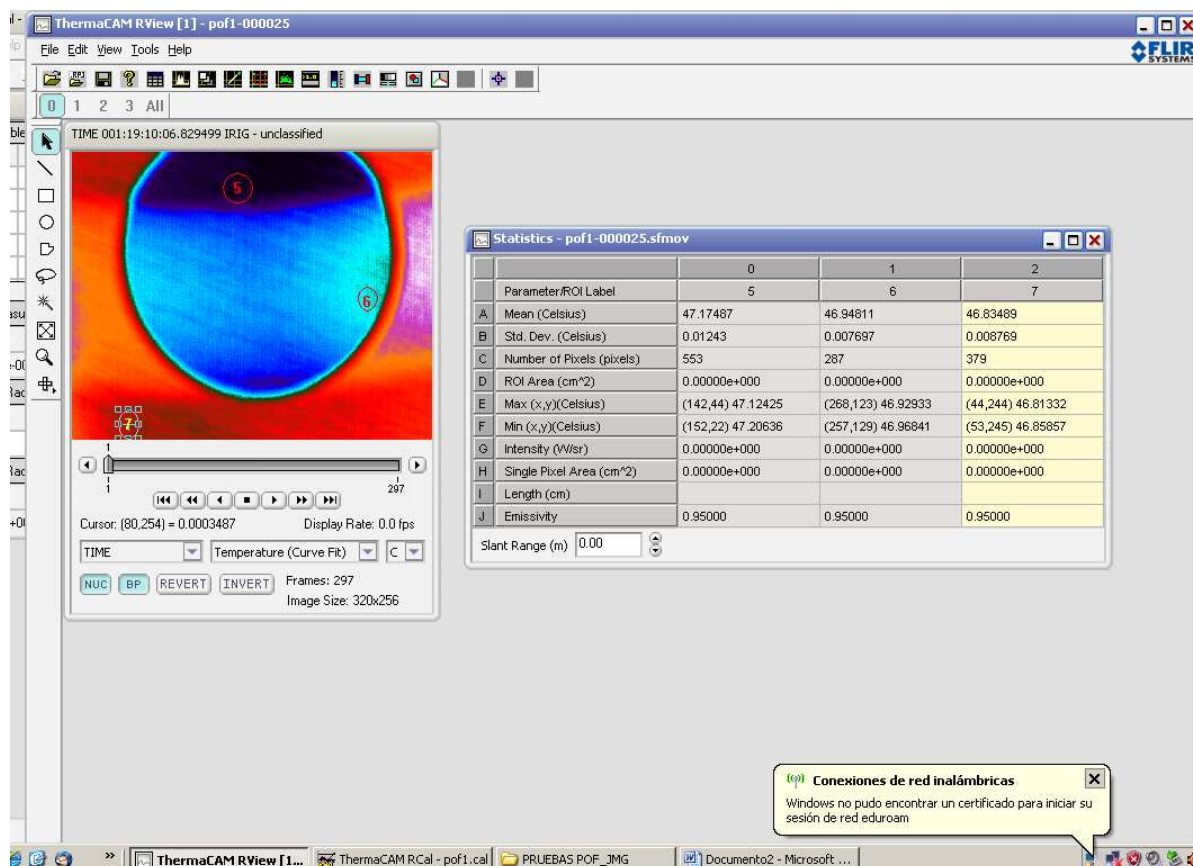


Figura 73: Prueba B. Emisvidades constantes. ROI'S puntuales.

Los datos representados por el software de la cámara termográfica, nos indican que las temperaturas para las diferentes zonas que representa cada ROI son correlativas según su ubicación, como se puede comprobar en la Tabla 10.

Nº ROI	T (° C)	ε	ΔT (° C)	
5	47,21	0,95	5-6	0,24
6	46,97		6-7	0,11
7	46,86		5-7	0,35

Tabla 10: Valores de temperatura ROI'S Prueba B